

**Nutzung der räumlichen Variabilität von ausgewählten  
Standorteigenschaften für die ortsspezifische  
N-Düngung – Messung und Simulation**

Aus dem Fachbereich der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät  
der Humboldt-Universität zu Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum agriculturalarum  
(Dr. rer. agr.)

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl. Ing. agr. Karsten Lorenz  
geboren am 17.12.1967 in Beeskow

Berlin 2004

**Dekan: Prof. Dr. U.J. Nagel**

**Erstgutachter:**

**Zweitgutachter:**

**Prof. Dr. J. Zeitz**

**Dr. K.C. Kersebaum**

**Tag der Einreichung:**

**Tag der Promotion:**

**05. Oktober 2004**

**25. Februar 2005**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung und Problemstellung	1
1.2	Ziel der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Modellansätze zur N-Dynamik im Überblick</b>	<b>4</b>
2.1	Wasserbewegung im Boden	5
2.2	Stickstofftransport im Boden	5
2.3	Stickstofftransformation im Boden	6
2.4	Stickstoffaufnahme durch die Pflanze	8
2.5	Atmosphärische Stickstoffeinträge	8
2.6	Modellauswahl	9
<b>3</b>	<b>Beschreibung des Simulationsmodells HERMES</b>	<b>11</b>
3.1	Teilmodell Wasserhaushalt	11
3.2	Beschreibung des Nitrattransports	12
3.3	N-Transformation	13
3.3.1	Teilmodell N-Mineralisation	13
3.3.2	Abschätzung der Stickstoffverluste und -einträge	14
3.4	Beschreibung des Teilmodells Pflanzenwachstum	15
3.4.1	Trockenmasseproduktion	15
3.4.2	Wurzelverteilung	16
3.4.3	Stickstoffaufnahme	17
3.4.4	Pflanzenentwicklung	17
3.5	Zusatztool zur Beschreibung der Sonneneinstrahlung (SRAD)	18

<b>4</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>19</b>
4.1	Charakterisierung der Untersuchungsgebiete	19
4.1.1	Lage und Geologie	19
4.1.2	Boden und Relief	20
4.1.3	Klima und Witterungsverlauf	25
4.1.4	Nutzung	32
4.2	Bodenuntersuchungen	33
4.2.1	Beprobungsstrategie und -raster der Untersuchungsschläge	34
4.2.2	Probennahme auf den Untersuchungsschlägen	37
4.3	Datenaufbereitung	39
4.3.1	Karte der Reichsbodenschätzung (RBS)	39
4.3.2	Karte der elektrischen Leitfähigkeit (EC)	40
4.3.3	Digitale Hofbodenkarte (HBK)	41
4.3.4	Digitales Geländemodell (DGM)	41
4.3.5	N-Düngung	41
4.3.6	Ertragskarten	43
4.4	Auswertungsmethode – Geostatistik	45
4.4.1	Variogrammanalyse	46
4.4.2	Kriging	48
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>52</b>
5.1	Räumliche Variabilität	52
5.1.1	Geostatistische Analyse der Basisdaten	52
5.1.2	Statistische Auswertung der Beprobungsdaten	60
5.1.3	Auswertung der Ertragskarten	69

5.2.	Sensitivitätsanalyse zum Modell HERMES	73
5.2.1	Simulation über das Winterhalbjahr	73
5.2.2	Simulation über die Vegetationsperiode	76
5.2.3	Evaluierung weiterer Einflussgrößen	80
5.3	Messung und Simulation	84
5.3.1	Vergleich der gemessenen und simulierten Zustandsgrößen	
	Ertrag, Wassergehalt und mineralischer Stickstoff	84
5.3.2	Simulierte Bewirtschaftung mit unterschiedlichen Ausgangs- informationen	89
5.4	Unterschiedliche Düngungsvarianten	96
5.4.1	Vergleich von einheitlicher und ortsspezifischer Düngung	96
5.4.2	Szenariorechnung für eine einheitliche und eine ortsspezifische Bewirtschaftung des Gesamtschlages	97
5.4.3	Simulierte Effekte bei unterschiedlichen Düngungsszenarien	99
5.5	Diskussion	105
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung – Summary</b>	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>117</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung</b>	<b>134</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>135</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Skizze des Stickstoffkreislaufs in Ackerböden	4
Abb. 3.1:	Aufbau des N-Modells HERMES (angelehnt an KERSEBAUM, 1989 & 1995)	11
Abb. 3.2:	Kompartimentmodell einer Bodensäule	12
Abb. 3.3:	Darstellung der N-Mineralisation in Abhängigkeit von Temperatur (a) und Wassergehalt (b) (nach Angaben von KERSEBAUM, In: SHAFFER et al., 2001)	13
Abb. 3.4:	Modifikation der Denitrifikationsrate in Abhängigkeit von Temperatur und wassergefülltem Porenraum	14
Abb. 3.5:	Darstellung des maximalen und des kritischen N-Gehalts in der oberirdischen Trockenmasse in Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung des Winterweizens (nach Angaben von VIELEMEYER et al. (1983) und RICHTIE et al. (1988), In: KERSEBAUM, 1989)	16
Abb. 3.6:	Darstellung der Faktoren, die die potentielle Strahlung beeinflussen	18
Abb. 4.1:	Bodenübersichtskarte (BÜK 1000; KIESEL, 2002) mit den Bodenregionen und der Lage der Untersuchungsbetriebe	19
Abb. 4.2:	a) Ausschnitt aus der geologischen Karte (GÜK 500) von STREMMER (1981) über das Untersuchungsgebiet Thumb, b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag <i>Feldscheide-links</i>	20
Abb. 4.3:	a) Ausschnitt aus der geologischen Karte (GÜK 100) von HECK (1960) über das Untersuchungsgebiet Kassow, b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag <i>III</i>	21
Abb. 4.4:	a) Ausschnitt aus dem geologischen Kartenblatt Groß Twülpstedt (GK 25) von MESTWERDT (1914), b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag <i>Kamp-Ost</i>	22
Abb. 4.5:	a) Ausschnitt aus der geologischen Karte (GÜK 100) von ARNOLD (1959) über das Untersuchungsgebiet Beckum, b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag <i>Autobahn</i>	23
Abb. 4.6:	a) Ausschnitt aus dem geologischen Kartenblatt Cöthen (GK 25) von LINSTROW & WIEGERS (1913) mit dem Untersuchungsschlag <i>Finkenherd</i> , b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag <i>Finkenherd</i>	24

Abb. 4.7:	Wetterstation Thumby ( <i>preagro</i> 909): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz	27
Abb. 4.8:	Wetterstation Kassow ( <i>preagro</i> 905): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz (berechnet aus Daten der DWD-Messstelle Oettelin)	28
Abb. 4.9:	Wetterstation Groß Twülpstedt ( <i>preagro</i> 910): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz	29
Abb. 4.10:	Wetterstation Beckum ( <i>preagro</i> 911): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz	30
Abb. 4.11:	Wetterstation Drosa ( <i>Drosa-Flughafen</i> ): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz	31
Abb. 4.12:	Grafische Darstellung der durchschnittlichen klimatischen Wasserbilanz und ihrer Schwankungsbreite für die Standorte Thumby, Kassow, Groß Twülpstedt, Beckum und Wulfen über den Untersuchungszeitraum 2000 bis 2002	31
Abb. 4.13:	Beprobungsraster der Untersuchungsschläge mit Schlagteilung und Klassengrenzen der Reichsbodenschätzung: a) <i>Kamp-Ost</i> , b) <i>Feldscheide-links</i> , c) <i>Finkenherd</i> , d) <i>Autobahn</i> und e) <i>111-3</i>	35
Abb. 4.14:	Schematische Darstellung der Eindringtiefe des EC-Signals im vertikalen (v) und horizontalen (h) Messmodus (HERBST, 2002)	40
Abb. 4.15:	Grobschema zur N-Düngungsempfehlung mit dem Modul <i>preagro-N</i> (WENKEL et al., 2002)	42
Abb. 4.16:	Prinzip der modellbasierten N-Düngerbedarfermittlung nach N-Modell HERMES (KERSEBAUM & BEBLIK, 2001)	43
Abb. 4.17:	Darstellung möglicher Fehlerquellen bei der Ertragskartierung für Schlag <i>Autobahn</i>	44
Abb. 4.18:	Grafische Darstellung: a) idealisiertes Variogramm ohne Nugget-Effekt, b) lineares und sphärisches Variogrammmodell mit Nugget-Effekt, c) Variogramm mit Trend, d) Variogramm mit Hole-Effekt	47
Abb. 4.19:	Anisotropie – Semivariogramme einer Bodenbeprobung entlang dreier Transekte in einem Schlag mit ungleichmäßiger Tonverteilung (NIELSEN & WENDROTH, 2003)	48
Abb. 5.1:	Variogramme für verschiedene Bodenparameter	52

Abb. 5.2:	Räumliche Verteilung wichtiger Modelleingangsdaten auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) Bodenart nach Rasterbeprobungsdaten, b) $C_{org}$ -Gehalt (0 - 3 dm), c) $N_{min}$ -Verteilung (0 - 9 dm) am 15.09.99	56
Abb. 5.3:	Tongehaltskarten vom Schlag <i>Autobahn</i> : a) mittlerer Tongehalt in 0 - 9 dm Tiefe nach Rasterbeprobung, b) Tonverteilung nach EC-Messung, c) Tongehaltsverteilung nach Co-Kriging von Rasterdaten mit EC-Messung	58
Abb. 5.4:	Grafische Darstellung des Range für die untersuchten Tiefenzonen zu verschiedenen Messterminen auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) volumetrischer Wassergehalt und b) $N_{min}$ -Gehalt	58
Abb. 5.5:	Grafische Darstellung des Range für den $N_{min}$ -Gehalt (0 - 9 dm) bei unterschiedlicher Bewirtschaftung auf Schlag <i>Autobahn</i> (n = 30/Variante)	59
Abb. 5.6:	Darstellung der $N_{min}$ -Verteilung über die Tiefe zu verschiedenen Messterminen auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) Nest 1, b) Nest 2	67
Abb. 5.7:	Darstellung der Nitrat- und Ammonium-Verteilung über die Tiefe zu verschiedenen Messterminen auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) Nest 1, b) Nest 2	68
Abb. 5.8:	Darstellung der $N_{min}$ -Tiefenverteilung zu verschiedenen Messterminen im Nest 1 auf Schlag <i>Autobahn</i>	69
Abb. 5.9:	Zonierung der Ertragskarten von 1999 bis 2002 für Schlag <i>Autobahn</i> , Rastergröße: 10 m	69
Abb. 5.10:	Zonierung der Ertragskarten von 1999 bis 2002 für Schlag <i>Finkenherd</i> , Rastergröße: 10 m	70
Abb. 5.11:	Ertragszonierung (basiert auf der Ertragskartierung von 1999 bis 2001) für Schlag <i>Finkenherd</i> mit Klassengrenzen der Bodenarten aus der Rasterkartierung, Rastergröße: 10 m	71
Abb. 5.12:	Ertragsklassifizierung (basiert auf der Ertragszonen von 1999 bis 2002) für Schlag <i>Autobahn</i> mit Klassengrenzen der Bodenarten aus der Rasterkartierung, Rastergröße: 10 m	71
Abb. 5.13:	Arbeitsschritte zur Identifizierung von Ertragszonen – dargestellt am Beispiel vom Schlag <i>Autobahn</i> : a) Verteilung der Ertragszonen (Ertragskarte 2000), b) Ertragsklassifizierung nach Auswertung der Ertragskarten von 1999 bis 2002 und c) abgeleitete Grenzen der Ertragszonen aus Abbildung b	72
Abb. 5.14:	Standarddatensatz für die Sensitivitätsanalyse	73



Abb. 5.15:	Darstellung der Sensitivität des $N_{\min}$ -Wertes bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und $C_{\text{org}}$ -Gehalt für das Modell HERMES ( $N_{\min}$ -Standard = 100 % bei $C_{\text{org}} = 1.4$ % und $\Theta_{\text{FK}} = 0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , Isolinienabstufung 5 %)	74
Abb. 5.16:	Darstellung der Sensitivität des $N_{\min}$ -Wertes bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und $N_{\min}$ -Anfangsgehalt für das Modell HERMES ( $N_{\min}$ -Standard = 100 % bei $N_{\min} = 50 \text{ kg N/ha/9 dm}$ und $\Theta_{\text{FK}} = 0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , Isolinienabstufung 5 %)	75
Abb. 5.17:	Darstellung der Sensitivität des $N_{\min}$ -Wertes bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und Niederschlagsmenge für das Modell HERMES ( $N_{\min}$ -Standard = 100 % bei 390 mm Niederschlag und $\Theta_{\text{FK}} = 0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , Isolinienabstufung 5 %)	76
Abb. 5.18:	Darstellung der Sensitivität der Trockenmasseproduktion bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und Niederschlagsmenge für das Modell HERMES (gebildete Trockenmasse beim Standard = 16.3 t/ha = 100 %, Isolinienabstufung 5 %)	77
Abb. 5.19:	Darstellung der Änderung des N-Angebotes bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und Niederschlagsmenge für das Modell HERMES (N-Angebot beim Standard = 270 kg N/ha, Isolinienabstufung 5 kg N/ha)	77
Abb. 5.20:	Darstellung der Änderung der N-Mineralisation bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und Niederschlagsmenge (N-Mineralisation beim Standard = 170 kg N/ha = 100 %)	78
Abb. 5.21:	Darstellung der Sensitivität von N-Mineralisation und Trockenmassebildung bei Änderung der täglichen Tagesmitteltemperatur (Standard = 165 kg N/ha = 15.2 t TM/ha = 100 %)	79
Abb. 5.22:	Darstellung der Sensitivität der Trockenmasseproduktion bei Änderung des $A_{\max}$ -Wertes für das Modell HERMES (Standard = 15.2 t TM/ha = 100 % bei einem $A_{\max}$ -Wert von 37 kg $\text{CO}_2/\text{ha Blattfläche/h}$ )	79
Abb. 5.23:	Darstellung der Sensitivität der Trockenmasse bei reduzierter Einstrahlung (gebildete Trockenmasse bei 100 % Einstrahlung = 15.2 t TM/ha = Standard)	80
Abb. 5.24:	Darstellung der Sensitivität der Trockenmassebildung bei Variation des Grundwasserflurabstandes stellvertretend für die Bodenarten S12 und Tu3 (Grundwasserflurabstand beim Standard = 20 dm = 100 %) und 390 mm Jahresniederschlag	81

Abb. 5.25:	Darstellung der Sensitivität von Wassergehalt, $N_{\min}$ -Gehalt, Trockenmasse und N-Mineralisation bei Änderung der Lagerungsdichtestufe (Ld) unter Sl2- bzw. Tu3-Böden (Ld = 1 - 2 = Standard = 100 %)	82
Abb. 5.26:	Darstellung der Sensitivität von Wassergehalt, $N_{\min}$ -Gehalt, Trockenmasse und N-Mineralisation bei Änderung des Steingehaltes unter Sl2- bzw. Tu3-Böden (Steingehalt = 0 % = Standard = 100 %)	82
Abb. 5.27:	Vergleich gemessener und simulierter Werte nach einjähriger Simulation zu Winterweizen in 2000 auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) beim Wassergehalt (0 - 9 dm), b) beim Kornertrag und c) beim $N_{\min}$ -Gehalt (0 - 9 dm) nach der Ernte	84
Abb. 5.28:	Vergleich der Schlagmuster von gemessenen und simulierten Werten nach einjähriger Simulation zur Ernte nach Winterweizen in 2000 auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) beim Wassergehalt (0 - 9 dm), b) beim Ertrag und c) beim $N_{\min}$ -Gehalt (0 - 9 dm)	86
Abb. 5.29:	Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen $N_{\min}$ -Werten (a) und Wassergehalten (c), Vergleich von gemessenen und simulierten $N_{\min}$ -Werten (b) und Wassergehalten (d) zur Ernte nach Winterweizen in 2000 auf Schlag <i>Autobahn</i>	87
Abb. 5.30:	Darstellung der Regressionen von gemessenen und simulierten Werten für Schlag <i>Autobahn</i> (0 - 9 dm): a) $N_{\min}$ -Gehalte in 2001, b) Wassergehalte in 2001, c) $N_{\min}$ -Gehalte in 2002 sowie d) Wassergehalte in 2002	88
Abb. 5.31:	Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) für Schlag <i>Autobahn</i> während des Untersuchungszeitraumes von 1999 bis 2002 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 60)	89
Abb. 5.32:	Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag <i>Autobahn</i> : a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Resterbeprobung	90
Abb. 5.33:	Darstellung der simulierten Ertragsverteilung von Winterweizen in 2000 auf Schlag <i>Autobahn</i> bei Verwendung unterschiedlicher Bodenbasisdaten an den Rasterpunkten: a) Reichsbodenschätzung, b) Hofbodenkarte und c) Rasterbodendaten. In d) ist die reale Ertragskarte für Winterweizen dargestellt.	93
Abb. 5.34:	Düngungsempfehlungen nach N-Modell HERMES zu Winterweizen in 2000 auf Schlag <i>Autobahn</i> auf Basis von: a) Profildaten der Reichsbodenschätzung, b) Profildaten der Hofbodenkarten und c) Profildaten des Untersuchungsasters. In d) ist die Düngungsempfehlung nach <i>preagro-N</i> Modul zu sehen.	94

Abb. 5.35:	Darstellung der Differenzen zwischen den Düngungsempfehlungen für Schlag <i>Autobahn</i> auf Basis der Rasterpunktprofile (Referenz) zu den Modellempfehlungen auf Grundlage: a) der Reichsbodenschätzung, b) der Hofbodenkarte sowie nach Empfehlung c) des <i>preagro-N</i> Moduls	94
Abb. 5.36:	Darstellung simulierter Effekte für unterschiedliche Düngermengen zu Winterweizen während der Vegetationsperiode 2000 auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) Mittelwerte über alle Rasterpunkte mit Darstellung der beobachteten Mittelwerte aus der realen Bewirtschaftung, b) für ausgewählte Bohrpunkte des Probenahmerasters mit Modellempfehlung zur Düngung nach HERMES	99
Abb. 5.37:	Darstellung der N-Differenz an den Bohrpunkten (einheitliche betriebsübliche Düngung minus Düngung nach Modellempfehlung) für Winterweizen auf den Schlägen: a) <i>Feldscheide-links</i> , b) <i>Kamp-Ost</i> , c) <i>Autobahn</i> und d) <i>Finkenherd</i>	101
Abb. 5.38:	Darstellung der simulierten Nitratauswaschung nach Winterweizenanbau auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) bei einheitlicher (betriebsüblicher) Düngung und b) bei Düngung nach Modellempfehlung (HERMES). In c) ist die Reduzierung der Nitratauswaschung zwischen Modellempfehlung und einheitlicher Düngung dargestellt und d) zeigt die Karte der Bodentextur (nach Rasterbeprobung).	103
Abb. 5.39:	Darstellung für Schlag <i>Autobahn</i> : a) die maximal mögliche N-Düngermenge, bei der der Nitratgrenzwert (50 mg NO <sub>3</sub> /l) nicht überschritten wird, b) der potentielle Höchstertrag bei optimaler N-Düngermenge und c) prozentuale Abweichung zum potentiellen Höchstertrag bei maximaler N-Düngung ohne Überschreitung des Nitratgrenzwertes	104
Abb. 9.1:	Tongehaltskarten vom Schlag <i>Kamp-Ost</i> : a) mittlerer Tongehalt in 0 - 9 dm nach Rasterbeprobung, b) Tonverteilung nach EC-Messung	137
Abb. 9.2:	Grafische Darstellung des Range für die untersuchten Tiefenzonen zu verschiedenen Messterminen auf Schlag <i>Finkenherd</i> : a) volumetrischer Wassergehalt und b) N <sub>min</sub> -Gehalt	137
Abb. 9.3:	Darstellung der N <sub>min</sub> -Kurve über die Tiefe zu verschiedenen Messterminen für Schlag <i>Feldscheide-links</i> : a) Nest 1, b) Nest 2, c) Nest 3, d) Nest 4	138
Abb. 9.4:	Darstellung der N <sub>min</sub> -Tiefenverteilung zu verschiedenen Messterminen im Nest 2 auf Schlag <i>Autobahn</i>	139

Abb. 9.5:	Zonierung der Ertragskarten von 2000 bis 2002 für Schlag <i>Feldscheide-links</i>	139
Abb. 9.6:	Zonierung der Ertragskarten von 1999 bis 2001 für Schlag <i>III-3</i>	140
Abb. 9.7:	Zonierung der Ertragskarten von 1999 bis 2001 für Schlag <i>Kamp-Ost</i>	140
Abb. 9.8:	Ertragsklassifizierung (basierend auf den Ertragszonen von 1999 bis 2001) für Schlag <i>Feldscheide-links</i> mit Klassengrenzen der Bodenart aus der Rasterkartierung	140
Abb. 9.9:	Ertragsklassifizierung (basierend auf den Ertragszonen von 1999 bis 2001) für Schlag <i>Kamp-Ost</i> mit Klassengrenzen der Bodenart aus der Rasterkartierung	141
Abb. 9.10:	Vergleich gemessener und simulierter Werte nach einjähriger Simulation zu Winterweizen in 2001 auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) beim Wassergehalt (0 - 9 dm), b) beim Kornertrag und c) beim $N_{\min}$ -Gehalt (0 - 9 dm) nach der Ernte	141
Abb. 9.11:	Vergleich gemessener und simulierter Werte nach einjähriger Simulation zu Winterweizen in 2002 auf Schlag <i>Autobahn</i> : a) beim Wassergehalt (0 - 9 dm), b) beim Kornertrag und c) beim $N_{\min}$ -Gehalt (0 - 9 dm) nach der Ernte	142
Abb. 9.12:	Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) des Schlages <i>Feldscheide-links</i> während des Untersuchungszeitraumes 2000 bis 2001 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 50)	142
Abb. 9.13:	Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) des Schlages <i>III-3</i> während des Untersuchungszeitraumes 1999 bis 2001 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 116)	143
Abb. 9.14:	Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) des Schlages <i>Kamp-Ost</i> während des Untersuchungszeitraumes 1999 bis 2002 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 59)	143
Abb. 9.15:	Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) des Schlages <i>Finkenherd</i> während des Untersuchungszeitraumes 2000 bis 2002 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 51)	144
Abb. 9.16:	Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag <i>Feldscheide-links</i> : a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung	144

Abb. 9.17:	Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag <i>III-3</i> : a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung	145
Abb. 9.18:	Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag <i>Kamp-Ost</i> : a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung	145
Abb. 9.19:	Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag <i>Finkenherd</i> : a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung	146

## Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1:	Übersicht über die Untersuchungsschläge zu Schlaggröße, Höhe, Relief, Bodenform und Bodenzahl	25
Tab. 4.2:	Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag der Untersuchungsstandorte	25
Tab. 4.3:	Fruchtfolgen der Untersuchungsschläge	32
Tab. 4.4:	Übersicht über Managementmaßnahmen auf Schlag <i>Autobahn</i> während des Untersuchungszeitraums von 1999 bis 2002 (ohne Pflanzenschutz)	33
Tab. 4.5:	Probenahmeraster der Untersuchungsschläge	37
Tab. 5.1:	Variogramm-Kenngrößen von Bodenparametern	54
Tab. 5.2:	Variogramm-Kenngrößen von Nährstoffdaten	54
Tab. 5.3:	Variogramm-Kenngrößen des mineralischen Stickstoffs ( $N_{\min}$ ) und des volumetrischen Wassergehalts	55
Tab. 5.4:	Statistische Kennwerte zum Wassergehalt bei Erstbeprobung unterteilt nach Tiefenstufen	60
Tab. 5.5:	Statistische Kennwerte zum $N_{\min}$ -Gehalt bei Erstbeprobung unterteilt nach Tiefenstufen	61
Tab. 5.6:	Klassifikation der Wassergehalte aus der Rasterbeprobung für Schlag <i>Autobahn</i> über 0-9 dm Tiefe nach Bodenartenhauptgruppen zu verschiedenen Messterminen	63
Tab. 5.7:	Klassifikation der $N_{\min}$ -Gehalte aus der Rasterbeprobung für Schlag <i>Autobahn</i> über 0-9 dm Tiefe nach Bodenartenhauptgruppen zu verschiedenen Messterminen	63
Tab. 5.8:	Klassifikation der Erträge für Schlag <i>Autobahn</i> nach Bodenartenhauptgruppen zu verschiedenen Messterminen	64
Tab. 5.9:	Wassergehalte der Nester und der Bodenartenhauptgruppe Sand nach der Rasterbeprobung für Schlag <i>Autobahn</i> über 0 - 9 dm Tiefe zu verschiedenen Messterminen	64
Tab. 5.10:	$N_{\min}$ -Gehalte der Nester und der Bodenartenhauptgruppe Sand nach der Rasterbeprobung für Schlag <i>Autobahn</i> über 0 - 9 dm Tiefe zu verschiedenen Messterminen	64

Tab. 5.11:	Statistische Kennwerte der $N_{\min}$ -Gehalte für die Nester der Schläge <i>Autobahn</i> und <i>Feldscheide-links</i> zu verschiedenen Messterminen	66
Tab. 5.12:	Wichtung einzelner Parameter für das Modell HERMES	83
Tab. 5.13:	Vergleich der auf unterschiedlichen Bodeninformationen basierenden Simulationswerte für Ertrag, Wasser- und $N_{\min}$ -Gehalt beim Anbau von Winterweizen mit den gemessenen Werten für die fünf Untersuchungsschläge	91
Tab. 5.14:	Düngerempfehlungen für den Gesamtschlag bei Nutzung unterschiedlicher Modelldaten für die ortsspezifische Düngung von Winterweizen	95
Tab. 5.15:	Vergleich unterschiedlicher Düngungsvarianten mit Modellrechnungen hinsichtlich Ertrag und $N_{\min}$ -Gehalt nach der Ernte	96
Tab. 5.16:	Vergleich einheitlicher und ortsspezifischer Düngung bei virtueller Übertragung des jeweiligen Düngungsregimes auf den Gesamtschlag unter Winterweizen	98
Tab. 5.17:	Variantenvergleich zwischen einheitlicher Düngung und Düngung nach Modellempfehlung (HERMES) hinsichtlich der Reduzierung der Düngermenge	100
Tab. 5.18:	Vergleich verschiedener Düngungsvarianten hinsichtlich des N-Austrags und der Nitratkonzentration im Sickerwasser über den gesamten Untersuchungszeitraum	102
Tab. 9.1:	Übersicht über Managementmaßnahmen auf Schlag <i>Feldscheide-links</i> während des Untersuchungszeitraums von 2000 bis 2002 (ohne Pflanzenschutz)	135
Tab. 9.2:	Übersicht über Managementmaßnahmen auf Schlag <i>III-3</i> während des Untersuchungszeitraums von 1999 bis 2001 (ohne Pflanzenschutz)	135
Tab. 9.3:	Übersicht über Managementmaßnahmen auf dem Schlag <i>Kamp-Ost</i> während des Untersuchungszeitraums von 1999 bis 2002 (ohne Pflanzenschutz)	136
Tab. 9.4:	Übersicht über Managementmaßnahmen auf dem Schlag <i>Finkenherd</i> während des Untersuchungszeitraums von 2000 bis 2002 (ohne Pflanzenschutz)	136

## Verzeichnis der verwendeten Symbole

$A_{\max}$	maximale Assimilationsrate bei Lichtsättigung pro Hektar Blattfläche	[kg CO <sub>2</sub> /h]
BFI	Blattflächenindex	[ha Blatt/ha]
$c$	Nitrat-Konzentration in Lösung	[mg Nitrat/cm <sup>3</sup> ]
$c_{\min}$	Nitratkonzentration der Lösung an der Wurzeloberfläche	[mg Nitrat/cm <sup>3</sup> ]
$C_{\text{org}}$	organischer Kohlenstoff	[Masse-%]
$C_t$	Gesamtkohlenstoff	[Masse-%]
CV	Variationskoeffizient	[%]
D	effektiver Dispersionskoeffizient	[cm <sup>2</sup> /d]
$D_v$	Dispersionsfaktor	[cm]
EC	scheinbare elektrische Leitfähigkeit	[mS/m]
$E_{\text{pot}}$	potentielle Evaporation	[cm/d]
$ET_{\text{pot}}$	potentielle Evapotranspiration	[cm/d]
$i$	Tiefenkompartiment(-zähler)	[-]
$k_{\text{fast}}$	Abbaukoeffizient der schnell abbaubaren Stickstofffraktion	[1/d]
KG	Korngrößenzusammensetzung	[Masse-%]
$K_{\text{NO}_3}$	Michaelis-Menten-Koeffizient für Boden-Nitratkonzentration	[kg NO <sub>3</sub> -N/ha]
$k_{\text{slow}}$	Abbaukoeffizient der langsam abbaubaren Stickstofffraktion	[1/d]
Ld	effektive Lagerungsdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$n$	Stichprobenumfang	[-]
$N_{\text{den}}$	tägliche Denitrifikationsrate	[kg N/ha]
$N_{\text{dif}}$	Stickstoffanlieferung an die Wurzel durch Diffusion	[mg N/cm <sup>2</sup> ]
$N_{\text{fast}}$	potentielle Mineralisationsmenge der schnell abbaubaren Stickstofffraktion	[kg N/ha]
$N_{\text{krit}}$	kritischer Stickstoffgehalt in der Pflanze bezogen auf die Trockenmasse	[%]



$N_{ob}$	Stickstoffgehalt in den oberirdischen Pflanzenteilen bezogen auf die Trockenmasse	[%]
$NO_x$	Stickstoffoxide	[kg N/ha]
$N_{mas}$	Stickstoffanlieferung zur Wurzel durch Konvektion	[mg N/cm <sup>2</sup> ]
$N_{max}$	maximale Stickstoffanlieferung zur Wurzel durch Diffusion	[mg N/cm <sup>2</sup> ]
$N_{min}$	mineralischer Stickstoffgehalt (NH <sub>4</sub> -N + NO <sub>3</sub> -N)	[kg N/ha]
$N_{slow}$	potentielle Mineralisationsmenge der langsam abbaubaren Stickstofffraktion	[kg N/ha]
$N_t$	Gesamt-Stickstoffgehalt	[%]
$q$	Wasserfluss	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ]
$r_i$	Radius aus dem Nährstoffe über die Wurzel aufgenommen werden	[cm]
$r_w$	Wurzelradius	[cm]
$s$	Standardabweichung	
$t$	Zeit	[d]
$\Delta t$	Zeitschritt	[d]
$T$	Temperatur	[°C]
$T_{krit}$	kritischer Temperaturwert bei der Denitrifikation	[°C]
$TP_i$	Wasseraufnahme der Pflanze im i-ten Kompartiment	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> *d]
$V_{max}$	maximale Denitrifikationsrate pro Tag	[kg N/ha/d]
$WD$	Wurzellängendichte	[cm Wurzel/cm <sup>3</sup> ]
$W_{red}$	Wachstumsreduktionsfaktor bei Stickstoffmangel	[-]
$z$	Tiefe	[cm]
$\Delta z$	Kompartimentmächtigkeit	[cm]
$ZW$	Durchwurzelungstiefe	[cm]
$\rho_t$	Trockenrohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\Theta$	volumetrischer Wassergehalt	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]

$\Theta_{FK}$	volumetrischer Wassergehalt bei Feldkapazität	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]
$\Theta_{krit}$	kritischer volumetrischer Wassergehalt bei der Denitrifikation	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]
$\Theta_{PWP}$	volumetrischer Wassergehalt bei Permanentem Welkepunkt	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]
$\Theta_{SAT}$	volumetrischer Wassergehalt bei Sättigung	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]
$\Theta_r$	wassergefüllter Porenraum	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]
$\Theta_{300}$	volumetrischer Wassergehalt bei 300cm Wassersäule	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]

## Abkürzungen

AAS	Atomabsorptionsphotometer
Ap	A-Horizont, durch regelmäßige Bodenbearbeitung geprägt, Ackerkrume
BÜK	Bodenübersichtskarte
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differentielles Globales Positionierungssystem
GK	Geologisches Kartenblatt
GÜK	Geologische Übersichtskarte
HBK	Hofbodenkarte
KA4	Bodenkundliche Kartieranleitung (4. Auflage)
RBS	Reichsbodenschätzung
TR	Triticale
WG	Wintergerste
Wg.	Wassergehalt
WRa	Winterraps
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrübe

# 1 Einleitung

## 1.1 Einleitung und Problemstellung

Auf landwirtschaftlich genutzten Schlägen variieren Pflanzenbestände mitunter sehr stark. Dieses Phänomen findet man häufig auch auf Flächen mit fast identischen Bodeneigenschaften, die einheitlich bewirtschaftet werden. Lokal kann die räumliche Variation der Pflanzenerträge zum einen mit einer Unterversorgung des Bestandes und zum anderen mit unerwünschten Nährstoffverlusten und Austrägen ins Grundwasser einhergehen. Um Nährstoffe, insbesondere Stickstoff (N), bedarfsgerecht innerhalb von Ackerflächen zu verteilen, ist es erforderlich, die räumlichen Prozesse, die der Ertragsbildung zugrunde liegen und ihre zeitliche Dynamik zu kennen. Durch die Berücksichtigung der schlaginternen Variabilität von ertragsbeeinflussenden Faktoren ergibt sich die Möglichkeit einer abgestuften, standortangepassten (teilflächenspezifischen) Bewirtschaftung, die bei der N-Düngung positive Effekte hinsichtlich einer höheren Düngereffizienz erwarten lässt (KERSEBAUM, 1998). Aus Sicht der Landmaschinenindustrie ist mit Einführung von Computertechnik und Globalpositionssystemen (GPS) in der modernen Landwirtschaft das technische Problem, Nährstoffe teilflächenspezifisch (= ortsspezifisch) zu dosieren, im Grundsatz gelöst (LEITHOLD, 2000; DEMMEL, 2002).

Gegenwärtig werden in der Bundesrepublik verschiedene Methoden der Düngerbedarfsermittlung für Stickstoff eingesetzt. Unklar ist jedoch, inwieweit die bislang in der Praxis üblichen Verfahren zur Stickstoffbedarfsermittlung in der Lage sind, mit vertretbarem Aufwand der Standortvariabilität und der N-Dynamik Rechnung zu tragen. Der Nachweis, ob durch teilflächenspezifische N-Dosierung unerwünschte ökologische Schäden durch Nitrataustrag zu vermeiden sind, wie auch die Frage nach dem Einsparungspotential von Düngemitteln bei der Teilflächenbewirtschaftung sind noch nicht hinreichend geklärt.

Um zur Klärung dieser Problematik beitragen zu können, wurde im Jahre 1999 das vom BMBF geförderte Verbundprojekt *preagro* ins Leben gerufen, dass sich mit der Entwicklung eines Managementsystems für den ortsspezifischen Pflanzenbau beschäftigt. Dieses Projekt soll die technisch-methodischen Voraussetzungen für die Umsetzung des teilflächenspezifischen Landbaus in der Praxis schaffen (WERNER et al., 2002). Ein Schwerpunkt im Projekt *preagro* stellt die Berechnung der N-Düngungsempfehlung dar, die in dieser Arbeit näher vorgestellt werden soll.

Aufgrund der komplexen Dynamik von Stickstoff ist eine einfache Nährstoffbilanzierung zur Kalkulation der Stickstoffdüngung nicht möglich. Die räumliche Ertragsvariabilität innerhalb eines Schlates kann in aufeinander folgenden Jahren sehr unterschiedlich ausgeprägt sein (STAFFORD, 1999). So kommt die Ertragskarte des Vorjahres nicht ohne weiteres als Grundlage für die Düngerempfehlung des Folgejahres in Frage. Dies liegt daran, dass die Bestandesentwicklung sehr stark von der gegenwärtigen Witterung beeinflusst wird. Dabei wird ein räumliches Verhalten hervorgerufen, für dessen Beschreibung die eher statischen Bodenkenngrößen (z.B. Textur) nicht eignen (WENDROTH et al., 2002).

Die in der Praxis angewandten Verfahren zur Ermittlung des Stickstoffdüngungsbedarfs lassen sich in drei unterschiedliche Gruppen unterteilen:

1. Düngerempfehlungen auf der Basis von Bodenuntersuchungen [z.B. mineralischer Stickstoff, kurz  $N_{\min}$  (WEHRMANN & SCHARPF, 1986), Elektro-Ultrafiltration, kurz EUF (FÜRSTENFELD & HETTERICH, 1992)],

2. Düngeempfehlungen auf der Basis von Pflanzenanalysen (z.B. Nitrat-Schnelltest (WOLLRING & WEHRMANN, 1989), optische Chlorophyll-Messung (WOLLRING, 1996), optische Überfahrssensorik zur Chlorophyllmessung (LEITHOLD, 2000) und
3. Düngeempfehlungen auf der Basis von Modellrechnungen [Expertensysteme (WENKEL et al., 2001) oder Simulationsmodelle (ENGEL, 1995; KERSEBAUM, 1995; KERSEBAUM & BEBLIK, 2001)].

Zum Einsatz kommen diese Verfahren sowohl separat wie auch in unterschiedlichen Kombinationen. Da die meisten Verfahren jedoch punktorientiert arbeiten, wird die räumliche Variabilität vor allem wegen des hohen Arbeits- und Kostenaufwands bislang kaum berücksichtigt. Aussichtsreicher als die punktorientierten Verfahren scheint dagegen die Anwendung von optischen Sensoren zu sein. Diese erkennen während der Überfahrt zur N-Düngung anhand der von den Blättern reflektierten Strahlung Mangelzustände und setzen diese in ortsspezifische Steuerimpulse für den Düngerstreuer um (LEITHOLD, 2000). Aber auch dieses optische Verfahren gibt nur einen momentanen Zustand wieder. Im System Boden-Pflanze ist aber durch die Wechselwirkung sehr unterschiedlicher Prozesse von einer sehr schnellen Dynamik des verfügbaren Stickstoffs und wenig stabilen räumlichen Verteilungsmustern auszugehen (KERSEBAUM & LORENZ, 2003). Durch die Kopplung von prozessorientierten Simulationsmodellen mit Geographischen Informationssystemen (GIS) erscheint es möglich, räumlich variable, aber zeitstabile Standorteigenschaften (z.B. Relief, Textur) in eine zeitliche Dynamik zu transferieren und damit die unterschiedlichen saisonalen Gewichtungen einzelner Prozesse sich veränderbarer räumlicher Muster des Mineralstickstoffangebots und des Pflanzenwachstums abzubilden. Mit Hilfe derartig räumlich verteilter Simulationen lassen sich nach entsprechender Validierung standortspezifisch die Wirkung unterschiedlicher Düngungsstrategien auf die Effizienz und den Austrag von Stickstoff vergleichen. Die Erkenntnisse sollen Antworten auf die Frage geben, welche Genauigkeitsanforderungen sind an die Beschreibung der Standorte zu stellen, um eine hinreichend differenzierte Aussage zur Ertragsbildung und zur Nährstoffdynamik zu erreichen.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die räumliche und zeitliche Abbildung der N-Dynamik im Boden mittels Modellrechnung mit HERMES. Auf verschiedenen Standorten werden die Auswirkungen der einheitlichen und der ortsspezifischen Düngung hinsichtlich der N-Effizienz und des N-Austrages miteinander verglichen. In einem zweiten Schritt werden die hochauflösenden Datensätze der Rasterbeprobung im Simulationsmodell durch Bodendaten der Reichsbodenschätzung bzw. der digitalen Hofbodenkarte ersetzt, die in deutlich geringerer räumlicher Auflösung vorliegen. Aus den Vergleichen sollen Strategien zur räumlichen und zeitlichen Auflösung von Maßnahmen für die ortsspezifische Düngung abgeleitet werden.

1. Zeigen die verschiedenen Untersuchungsregionen bei den Standorteigenschaften räumliche Unterschiede?
2. Lassen sich bestimmte Standorteigenschaften auf den Schlägen durch Unterteilung in ihrer räumlichen Ausbreitung eingrenzen?
3. Inwieweit lassen sich die flächenhaft vorliegenden Messdaten der elektrischen Leitfähigkeit für die räumliche Verteilung der Tongehalte im Boden nutzen?
4. Welche Rückschlüsse lassen sich aus den Mustern der Ertragskarten ziehen?
5. Lassen sich mit dem N-Modell HERMES die Wasser- und Stickstoffdynamik im Boden sowie der Kornertrag für verschiedene Untersuchungsgebiete befriedigend abbilden?

6. Eignen sich Bodeninformationen aus der Reichsbodenschätzung bzw. der digitalen Hofbodenkarte für die Berechnung der ortsspezifischen N-Düngungsempfehlung?
7. Bewirkt die ortsspezifische N-Düngung eine Reduzierung der Düngermenge bzw. eine Ertragssteigerung auf den untersuchten Schlägen gegenüber der einheitlichen Düngung?
8. Ergeben sich durch ortsspezifische N-Düngung ökologische Vorteile, wie Reduzierung der Nitratauswaschung gegenüber der herkömmlichen einheitlichen Düngung?

## 2 Modellansätze zur N-Dynamik im Überblick

Wie Abb. 2.1 zeigt, unterliegt Stickstoff im Boden einer Vielzahl von physikochemischen und biologischen Transformationen. Überschüssiger Stickstoff wird, soweit er nicht organisch gebunden werden kann, entweder in gasförmiger Form ( $N_2$ ,  $N_2O$ ) freigesetzt oder in mineralischer Form in andere Ökosysteme oder benachbarte Sphären (Atmosphäre, Grundwasser) transportiert.

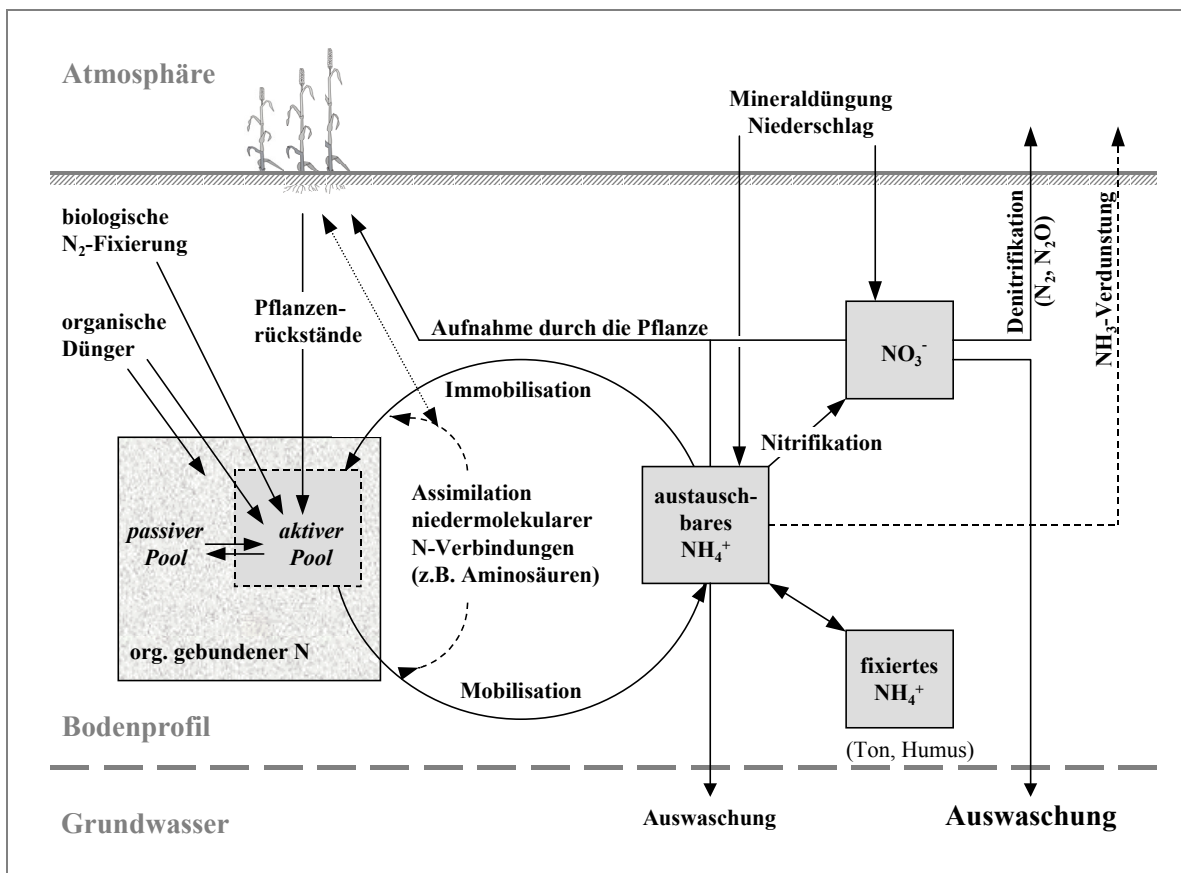


Abb. 2.1: Skizze des Stickstoffkreislaufs in Ackerböden

Seit Beginn der siebziger Jahre wird aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen verstärkt an der Aufklärung der Prozesse und Wechselwirkungen und ihrer Abhängigkeiten von äußeren Bedingungen (z.B. Temperatur, Niederschlag, Bewirtschaftung) im Agrarökosystem gearbeitet. Dabei kommen immer häufiger Modellmethoden zum Einsatz.

Die N-Modelle unterscheidet man dahingehend, in welchem Ausmaß sie die Einzelprozesse der N-Dynamik bei der Simulation berücksichtigen. Die Komplexität der Beschreibung einzelner Teilprozesse hängt vor allem von der Zielstellung der Modelle ab. In der Literatur werden neben deterministischen Modellen (SCHEIDEGGER, 1961; BEAR, 1969) häufig stochastische Modelle (JURY & SPOSITO, 1985; DAGAN, 1988; DESTOUNI, 1991) wie auch Mischformen aus beiden Ansätzen (STOCK, 1995) erwähnt.

Deterministische Modelle laufen nach Vorgabe des Anfangszustandes und der Regeln immer in der gleichen Weise ab. Bei stochastischen Modellen wird mit Zufallselementen gearbeitet, entweder bei der Bestimmung der Anfangszustände oder während des Modellablaufs. Die Ergebnisse sind bei jedem Lauf etwas verschieden voneinander (PIEFKE, 1991). Während für stochastische Modelle die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Umweltgrößen bekannt sein

müssen, werden bei deterministischen Modellen die Umweltgrößen als vorhersehbar angenommen (MÖLLER, 1995).

In den meisten Fällen lässt sich eine eindeutige Zuordnung der komplexen, mehrere Prozesse beschreibenden Modelle zu bestimmten Modellmethoden nicht mehr eindeutig treffen, da die verschiedenen Prozesse unterschiedlich abgebildet werden.

## 2.1 Wasserbewegung im Boden

Bei der Modellierung des Bodenwasserhaushaltes kann zwischen zwei Vorgehensweisen unterschieden werden. Entweder wird der Wasserfluss durch die numerische Lösung einer potentialbasierten nichtlinearen partiellen Differentialgleichung (Richards-Gleichung) oder mittels eines Kapazitätsansatzes (ADDISCOTT & WAGENET, 1985), wie im Modell HERMES (KERSEBAUM, 1989 und 1993), beschrieben. Dieser Ansatz stellt im Vergleich zum ersten wesentlich geringere Anforderungen an die Eingabegrößen. Dieser Vorteil wird jedoch nur durch eine stark vereinfachte Abbildung des Wasserflusses erreicht. Neben dem Matrixfluss kommt es auf tonreichen Böden nach Trockenheit zu Rissen und verstärkten Makroporenfluss (*bypass-flow*), durch den Stoffe direkt bis ins Grundwasser verlagert werden (KOHL & HARRACH, 1991). Dieses Phänomen wird aber nur von wenigen Modellen mittels empirischer Ansätze beschrieben.

Eine Erweiterung für den Platten- oder Kaskadenansatz stellt die Einführung von Permeabilitätsfaktoren (RITCHIE, 1985; ADDISCOTT & BLAND, 1988) dar. Mit Hilfe der Permeabilitätsfaktoren kann ein zeitweiliges Überschreiten der Feldkapazität in schlecht drainierten Böden berücksichtigt werden. ADDISCOTT & BLAND (1988) leiten den von ihnen verwendeten Permeabilitätsfaktor vom Tongehalt des Bodens ab.

## 2.2 Stickstofftransport im Boden

Der Transport von Stickstoff im Boden wird durch die molekulare Diffusion und durch die Konvektion von Stoffen mit dem Wasserfluss bestimmt (BEESE, 1982). Die Strömung des Wassers sowie die darin gelösten Stoffe unterliegen einer hydrodynamischen Dispersion. Für Ionen, die nicht mit der Bodenmatrix in Wechselbeziehung treten (wie Nitrat), gilt beim vertikalen Transport die Konvektions-Dispersionsgleichung (VAN GENUCHTEN & ALVERS, 1982):

$$\frac{\partial \Theta c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \Theta * D * \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial qc}{\partial z} \quad (2.1)$$

Mit einem Plattenmodell (siehe Kap. 3.1) lässt sich der Stofftransport noch einfacher beschreiben, weil hier, wie schon beim Wasser, eine lokale Stoffbilanz die Grundlage bildet. Die meisten Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der Art der Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser. Erwähnt sei an dieser Stelle auch der Mischzellenansatz (VAN DER PLOEG et al., 1995). Der Vorteil des Mischzellenansatzes gegenüber der Konvektions-Dispersionsgleichung besteht darin, dass die Berechnung von Verlagerungs- und Auswaschungsvorgängen vereinfacht dargestellt werden kann. Dieser Modellansatz wird speziell im Winterhalbjahr genutzt, wenn quasi-stationäre Fließbedingungen im Boden vorliegen und die Böden sich annähernd bei Feldkapazität befinden.

---

**Parametererläuterung:** Die Bedeutung der in dieser Arbeit verwendeten Symbole und Variablenamen ist, soweit diese nicht im Text erläutert werden, dem Abkürzungsverzeichnis am Beginn der Arbeit zu entnehmen.

## 2.3 Stickstofftransformationen im Boden

### Mineralisation – Immobilisation

Von Mineralisation spricht man, wenn allgemein Stoffe durch Mikroben aus organischer Bindung in eine mineralische Form transferiert werden. Der umgekehrte Prozess heißt Immobilisation. Die Modellierung beider Prozesse erfolgt meist getrennt über die explizite Simulation der Populationsdynamik der mikrobiellen Biomasse im Boden. Sehr komplexe Ansätze kommen hier von BECK (1983), VAN VEEN et al. (1984), LÜTTICH (1987), TESKE et al. (1988), BIELEK (1997), MOLINA & SMITH (1998) und STEVENSON & COLE (1999), die gleichzeitig die Beschreibung der Kohlenstoffdynamik mit einbeziehen. Zum Teil werden auch Michaelis-Menten-Kinetiken verwendet.

Mit der Einführung der sog. Netto-N-Mineralisation (= N-Mineralisation abzüglich der N-Menge, die Mikroorganismen beim Abbau organischer Substanz assimilieren) kann die Mineralisation und Immobilisation von organischer Bodensubstanz und eingebrachter Pflanzenresiduen vereinfacht dargestellt werden. Die Beschreibung erfolgte meist durch Reaktionskinetiken 0. Ordnung (ADDISCOTT, 1983) oder 1. Ordnung (KNISEL, 1993; HUTSON, 2000; MA et al. 2001; SHAFFER et al., 1991 und 2001), die davon ausgehen, dass die mikrobielle Biomasse konstant bleibt.

Aufbauend auf dem kinetischen Ansatz von STANFORD & SMITH (1972) zur Netto-N-Mineralisation konnten sowohl MOLINA et al. (1980) als auch RICHTER et al. (1982) in Brutversuchen zwei (siehe Kap. 3.3.1) bzw. bei Verwendung von getrockneten Böden drei Fraktionen (RICHTER et al., 1982) mit unterschiedlichen charakteristischen Umsetzungskoeffizienten unterscheiden. Diese Ergebnisse wurden durch andere Autoren bestätigt (LÜTTICH, 1987; FREYTAG & LÜTTICH, 1988).

### Nitrifikation

Die Oxidation von Ammonium ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) über Nitrit ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) zu Nitrat ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) wird Nitrifikation genannt und größtenteils durch Bakterien gesteuert. Die Nitrifikation läuft über einen weiten Temperaturbereich (10 - 30 °C) deutlich schneller als die Freisetzung aus organischer Substanz ab (BECK, 1979). Erst ab Temperaturen von etwa 40 °C fallen die Ammonifikationsraten höher aus als die der Nitrifikation. Das erklärt, warum man bei Felduntersuchungen unter Ackerböden meist nur sehr geringe Anteile des Mineralstickstoffes in Form von Ammonium findet (SCHARPF, 1977; GUTSER & TEICHER, 1980). Neben niedrigen pH-Werten vermindern hohe Wassergehalte den streng aeroben Prozess im Boden deutlich. Laut SCHMIDT (1982) hemmt ein pH-Wert von  $\leq 4.0$  sogar die Nitrifikation. In Ackerböden kommen derartig niedrige pH-Werte in der Regel nicht vor.

Modellmäßig erfolgt die Beschreibung der Nitrifikation meist mit kinetischen Reaktionsgleichungen 1. Ordnung (z.B. WILLIAMS; 1995) oder 0. Ordnung (SHAFFER et al., 1991 und 2001). BEEK & FRISSEL (1973), FRISSEL & VAN VEEN (1982), VAN VEEN & FRISSEL (1981), GODWIN & JONES (1991) wie auch GODWIN & SINGH (1998) nutzen zur Modellierung der Nitrifikation Ansätze, die die Dynamik der Nitrifikantenpopulation unter Verwendung von Michaelis-Menten-Kinetiken mit einschließt. In einigen Ansätzen wird oft die Nitrifikation mit in die Mineralisation integriert, weil man davon ausgeht, dass die Nitrifikation in den meisten Fällen viel schneller abläuft als die Mineralisation (u.a. NUSKE, 1983; RICHTER et al., 1985).



### Denitrifikation

Als Denitrifikation bezeichnet man die mikrobielle Reduktion von Nitrat zu gasförmigen Verbindungen wie  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  oder  $\text{N}_2$ , die unter anaeroben Bedingungen abläuft. Eine wesentliche Rolle spielt bei der Denitrifikation neben der Bodenfeuchte, die Temperatur, der pH-Wert, der Gehalt an  $\text{NO}_3\text{-N}$  im Boden wie auch das Vorhandensein leicht verfügbarer C-Verbindungen (GRANLI & BÖCKMAN, 1994; SHAFFER et al., 1991 und 2001, MA et al., 2001). Verluste durch Denitrifikation sind schwer zu ermitteln, da sie hohen räumlichen (FOLORUNSO & ROLSTON, 1984; PARKIN, 1987; GRANLI & BÖCKMAN, 1994) und zeitlichen (SEXSTONE et al., 1985) Schwankungen unterliegen. Für ackerbaulich genutzte Böden in Mitteleuropa geben VINTHER (1984) und BENCKISER et al. (1987) 12 - 20 kg N/ha/a ohne Beregnung an, während NIEDER et al. (1989) von 20 - 30 kg N/ha/a – weitgehend unabhängig vom Bodentyp und der Bodenart – spricht. Experimente von HACK (1999) zeigen Werte von 0 - 50 kg N/ha/a, auf Schwarzerde sogar 100 kg N/ha/a.

Häufig wird die Denitrifikation in Modellen über Reaktionsgleichungen 0. bzw. 1. Ordnung (STANFORD et al., 1975a und 1975b) beschrieben. Eine Reaktion ist 0. Ordnung, wenn sie mit konstanter Geschwindigkeit abläuft, d.h. wenn ein Reaktand (hier  $\text{NO}_3\text{-N}$ ) unabhängig von der Ausgangskonzentration umgesetzt wird. Verläuft dagegen eine Umsetzung mit einer Geschwindigkeit, die proportional der sich mit der Zeit verändernden Konzentration des Ausgangsprodukts ist, so handelt es sich um eine Reaktion 1. Ordnung (RICHTER, 1986). Nach EL-DEMERDASH (1981) ist ausgehend von anaeroben Bedingungen und konstanten Temperaturen im Boden die Reaktionsordnung der Denitrifikation in erster Linie an den Gehalt der leicht mineralisierbaren organischen Substanz gekoppelt.

In den Modellen von SMITH (1980), VAN VEEN & FRISSEL (1981), BENCKISER & SYRING (1985), PARKIN & ROBINSON (1989), ROLSTON (1990) und SYRING & BENCKISER (1990) wird der Bodenlufthaushalt direkt oder indirekt in die Modellierung mit eingeschlossen.

Die direkte Quantifizierung der Denitrifikation im Freiland ist noch unbefriedigend. Häufig müssen sowohl zeitlich wie räumlich punktuelle Messungen in Jahresraten für ganze Schläge hochgerechnet werden. Die beiden gebräuchlichsten Methoden  $^{15}\text{N}$ -Isotopentechnik und die Acetylen-Inhibierungsmethode liefern keine befriedigenden Ergebnisse (BECKER et al., 1992). Diese grundlegenden methodischen Schwierigkeiten machten es bisher unmöglich sichere und verallgemeinerbare Denitrifikationsraten für einen Schlag über einen längeren Zeitraum anzugeben (NIEDER et al., 1989). GÄTH et al. (1999) versucht dieses Problem über eine Klassifizierung der Böden mit unterschiedlicher potentieller Denitrifikationsleistung indirekt abzuschätzen. Eine Abschätzung der Denitrifikation wird möglich, wenn der für einen definierten Zeitraum bilanzierte N-Überschuss mit dem über die Tiefenprofile gemessenen N-Austrag verglichen werden kann (BOUWER et al., 1997).

### Ammoniakverluste

Insbesondere bei oberflächlicher Gülleausbringung (AMBERGER et al., 1987) aber auch nach N-Düngung mit Ammonium- oder Harnstoffdüngern (HARGROVE et al., 1977) treten gasförmige Verluste in Form von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) auf. Die Höhe der Verluste wird durch die Temperatur und den pH-Wert des Bodens sowie die Eindringtiefe des Düngers beeinflusst. In der Regel werden die Verluste bei Gülle mit 30 - 60 % (AMBERGER et al., 1987) und für Harnstoffdünger mit 10 - 35 % (FINCK, 1997) angegeben. Durch die gezielte Auswahl des Ausbringungsverfahrens (z.B. Injektionsdüngung), der Ausbringungsform und des

Ausbringzeitpunktes sowie der sofortigen Einarbeitung der N-Dünger lassen sich Verluste deutlich verringern.

Komplexe Modellansätze zur Ammoniakentgasung finden sich bei HANSEN et al. (1995), GODWIN & SINGH (1998), MA et al. (2001) und SHAFFER et al. (1991 und 2001).

### **Adsorption und Desorption von Ammonium**

Neben den pflanzenverfügbaren, austauschbarem  $N_{\min}$  liegen im Boden auch beachtliche Mengen an Stickstoff in Form von nicht austauschbarem fixierten  $NH_4-N$  vor. Die Ammonium-Fixierung erfolgt vor allem in Vermiculit und Illit reichen Tonböden (SCHERER, 1987; LEIDIG, 1997).

Die Beschreibung der  $NH_4-N$ -Adsorption und Desorption wird nur in einigen N-Modellen berücksichtigt. Meist werden dafür einfache Gleichgewichts-Beziehungen (z.B. BEEK & FRISSEL, 1973) oder reversible 1. Ordnungs-Reaktionen (z.B. MEHRAN & TANJI, 1974; VAN VEEN & FRISSEL, 1981) verwendet.

## **2.4 Stickstoffaufnahme durch die Pflanze**

Bei der Modellierung des Pflanzenwachstums unterscheidet man hinsichtlich der Struktur und der genutzten Algorithmen in beschreibende und erklärende Modellansätze (PENNING DE VRIES, 1989; SCHMIDT, 1993). Im Fall des beschreibenden Ansatzes wird die Pflanze nur als Quelle bzw. Senke für die Modellierung des Bodenwasser- und Bodenstickstoffhaushaltes betrachtet. Der Stickstoffentzug wird mittels Entzugsfunktionen (z.B. Michaelis-Menten-Kinetiken, logistische Ansätze) in Abhängigkeit vom kumulativen Bedarf und der Vegetationsdauer berechnet. Bei diesem Ansatz bleiben Transport- und Transformationsprozesse innerhalb der Pflanze weitgehend unberücksichtigt.

Sog. erklärende Modelle versuchen detailliert die Prozesse der Pflanzenphysiologie in Abhängigkeit von Umweltbedingungen (Boden, Witterung, Bearbeitungsmanagement) abzubilden. So werden die für das Pflanzenwachstum entscheidenden Prozesse wie Photosynthese und C-Remobilisation aus Kohlenstoffquellen und die für die Erhaltung und das Wachstum notwendigen Atmungsprozesse quantifiziert (O'LEARY et al., 1985; RITCHIE et al., 1988; KERSEBAUM, 1989 und 1995; PORTER et al., 1993; MIRSCHEL et al., 1993). Über diese Prozesse erfolgt die Berechnung des Biomassezuwachses für die einzelnen Pflanzenorgane (WEIR et al., 1984; RITCHIE, 1985; GROOT, 1987).

Egal welcher der beiden Ansätze betrachtet wird, bei fast allen Modellen bleibt der Einfluss von Krankheiten, Schädlingen oder die Konkurrenz von Wildkräutern unberücksichtigt.

## **2.5 Atmosphärische Stickstoffeinträge**

Die Zufuhr von Stickstoff erfolgt nicht nur durch mineralische und organische Düngung sondern auch über symbiotische und asymbiotische Stickstoffbindungen von im Boden lebenden Organismen sowie über die trockene und nasse Deposition von zunehmend in der Atmosphäre vorhandenen Stickoxiden ( $NO_x$ ) und  $NH_3$ .

Über die biologische  $N_2$ -Fixierung werden in der Literatur unterschiedliche Angaben gemacht. STEVENSON (1982) setzt für die asymbiotische  $N_2$ -Bindung eine Jahresmenge von ca. 7 kg N/ha an. EVANS & BARBER (1977) geben für Organismen, die mit Leguminosen

in Symbiose leben, jährliche Fixierungsleistungen je nach Leguminosenart von 60 - 600 kg N/ha an.

Bei den jährlichen Depositionsmengen gibt es ebenfalls erhebliche Unsicherheiten. Die Angaben für Depositionen sind auf dem Gebiet der Bundesrepublik in den letzten 20 Jahren um mehr als das doppelte angestiegen. Lagen die Angaben für Einträge bis Mitte der 80er noch im Bereich von 12,5 - 25 kg N/ha/a (BÖTTCHER, 1983; ULRICH, 1986), so werden in neueren Untersuchungen erheblich höhere Einträge von bis zu 40 kg N/ha/a (BARTELS, 1991; HOMM, 1994) oder mehr (GRÜNHAGE et al., 1987) angegeben. Die Depositionseinträge variieren nicht nur räumlich sondern auch zeitlich sehr stark (MENGEL, 1991).

Bei den meisten Simulationen zur Stickstoffdynamik werden atmosphärische N-Einträge entweder über eine gleichmäßige Verteilung von mittleren Eintragsmengen übers Jahr (SMITH, 1982) oder über die Kopplung an die Niederschläge (z.B. DUYNISVELD & STREBEL, 1986) abgeschätzt.

## 2.6 Modellauswahl

Den vorangestellten Kap. 2.1 und 2.2 ist zu entnehmen, dass es unterschiedliche Ansätze für die Beschreibung der einzelnen Teilprozesse der C/N-Dynamik gibt. Je nach Fragestellung ist zu entscheiden, mit welcher Genauigkeit Prozesse abgebildet werden sollen. In vielen Fällen ist eine Vereinfachung der Prozesse (z.B. Kapazitätsansatz) vertretbar, um die Parametrisierung überschaubar zu halten.

Für die hier vorgelegte Arbeit, die im Rahmen des Verbundprojekts *preagro* entstand, wurde das Modell HERMES für die Berechnung der lokalen Stickstoffverlagerung auf den Untersuchungsschlägen vorgegeben. Das N-Haushaltsmodell HERMES erfüllt die gestellten Anforderungen:

- ist mehrfach in der Praxis getestet worden,
- arbeitet auf der Grundlage der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA4 (AG BODEN, 1994),
- verwendet Kenngrößen, die ohne großen Aufwand im Feld bestimmbar sind,
- ist universell einsetzbar (nicht gebietsbezogen),
- ist anwendbar für die meisten Getreidearten (speziell Winterweizen),
- ermöglicht eine tägliche Datenausgabe,
- ermöglicht die Simulation von Erträgen, Wasserverhältnissen und  $N_{\min}$ -Mengen im Boden über mehrere Jahre,
- kann bei Bedarf erweitert werden (offener Quellcode) und
- steht kostenlos zur Verfügung.

Ausschlaggebend waren neben der universellen Einsetzbarkeit des Modells auf allen Untersuchungsstandorten, die kostenlose Bereitstellung des Programms für die Projektlaufzeit. Das Simulationsprogramm setzt sich aus 5 Teilmodellen (siehe Kap. 3) zusammen, kommt mit relativ wenigen Eingangsgrößen aus und wurde mehrfach für die Düngeberechnung bei Getreide (z.B. im Projekt MOSAIK) wie auch zur Ermittlung der Nitratauswaschung verwendet (DIEKKRÜGER et al., 1995; KERSEBAUM, 1996 und 1997; REUTER et al., 2001; KERSEBAUM et al. 2001 und 2002; KERSEBAUM & LORENZ, 2002a und 2002b). Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass das Modell ständig weiterentwickelt und verbessert wird, da der Quellcode frei zugänglich ist und so keine zusätzlichen finanziellen Mittel für

Erweiterungstools benötigt werden. Es besteht die Möglichkeit je nach Schlagbesonderheit bestimmte Parameter (z.B. die Grundwasserschwankungsamplitude) oder sogar ganze Modellteile (wie das Einstrahlungsmodell) ein- oder abzuschalten. Durch die taggenaue Datenausgabe ist auch ein direkter Vergleich mit den Messwerten möglich.

### 3 Beschreibung des Simulationsmodells HERMES

Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsmodell HERMES stellt eine Modifikation des von KERSEBAUM (1989) beschriebenen Modells zur Stickstoffdynamik in Ackerböden dar. In diesem N-Modell werden basierend auf täglichen Witterungsdaten simultan die Prozesse der Stickstoffmineralisation, der Denitrifikation, des Wasserhaushalts, des Transports von Nitrat im Bodenprofil sowie das Wachstum und die Stickstoffaufnahme durch die Pflanze simuliert (Abb. 3.1). In erster Linie wird das Modell für die Lösung von Managementaufgaben (z.B. zur Berechnung von Düngeempfehlungen oder zur Ermittlung der Nitratauswaschung) benutzt, da es mit relativ wenigen Inputgrößen arbeitet. Weiterführende Modellbeschreibungen zu HERMES sind bei KERSEBAUM (1989, 1993 und 1995), KERSEBAUM & BEBLIK (2001) und KERSEBAUM et al. (2002) zu finden.

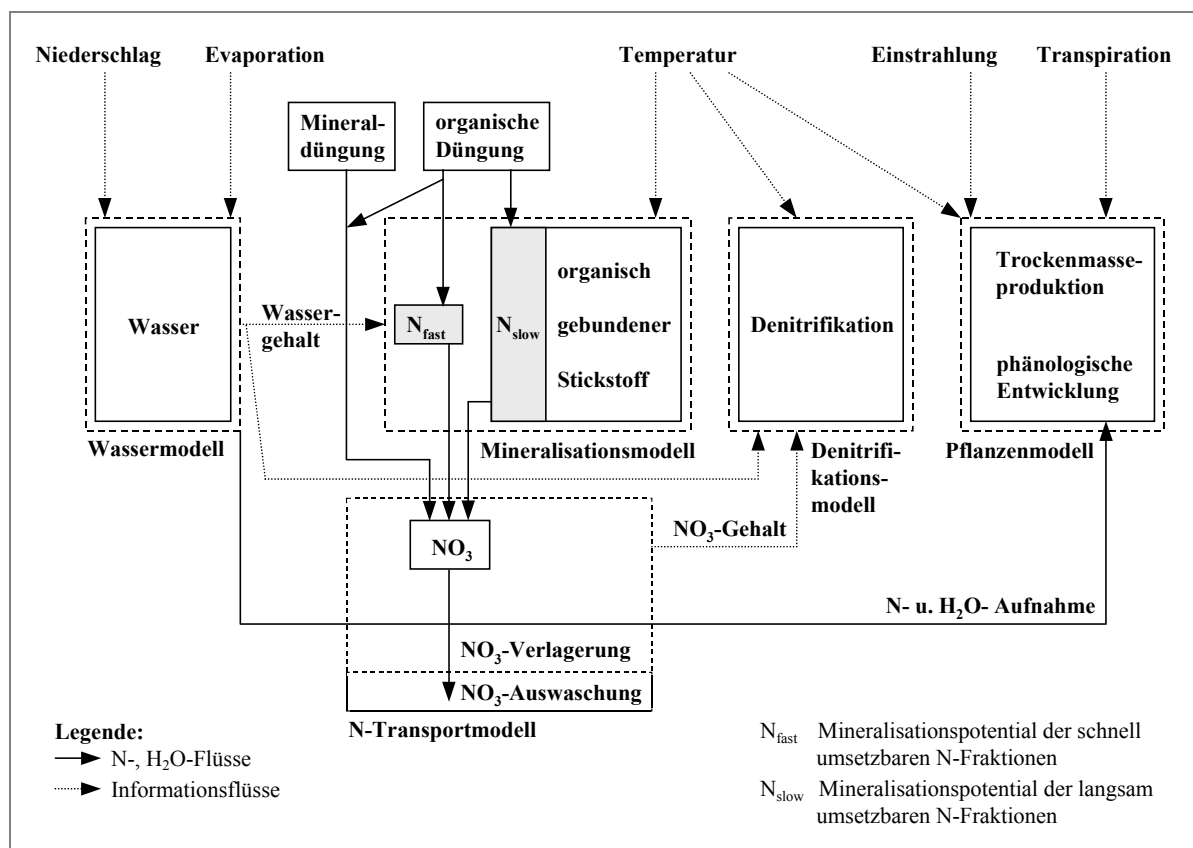
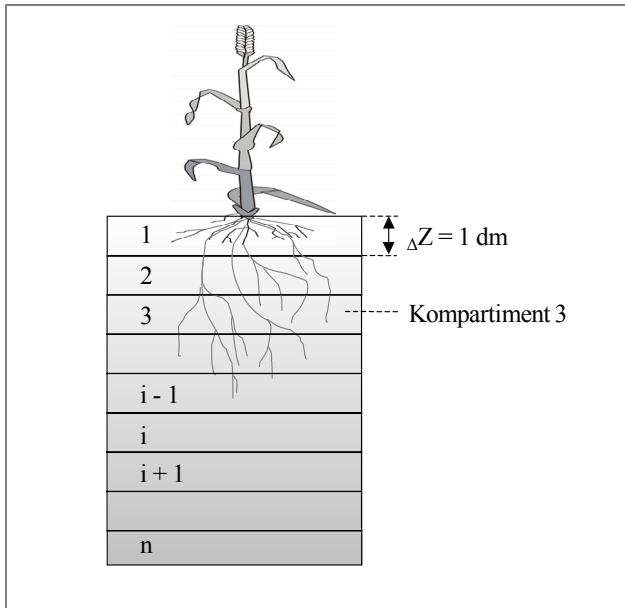


Abb. 3.1: Aufbau des N-Modells HERMES (angelehnt an KERSEBAUM, 1989 & 1995)

#### 3.1 Teilmodell Wasserhaushalt

Für die Beschreibung des Wasserhaushaltes wird ein einfaches Plattenmodell verwendet, das die betrachtete Bodenschicht in 1 dm mächtige Kompartimente aufteilt (Abb. 3.2). Dieser funktionale Ansatz benötigt kürzere Rechenzeiten und hat den Vorteil einer erheblich einfacheren Parameterableitung (ADDISCOTT & WAGENET, 1985).

Die notwendigen Kapazitätsparameter ( $\Theta_{FK}$  und  $\Theta_{PWP}$ ) für den verwendeten Modellansatz werden entsprechend der KA4 (AG BODEN, 1994) aus der Bodenart (mit entsprechender Lagerungsdichte) unter Berücksichtigung von Zu- bzw. Abschlägen für Grundwasserabstand und Humusgehalt abgeleitet.



**Abb. 3.2:** Kompartimentmodell einer Bodensäule

Der tägliche kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser wird entsprechend der KA4 (AG BODEN, 1994) in Abhängigkeit vom Abstand zum Grundwasser des jeweiligen untersten Tiefenkompartiments, dessen Wassergehalt 70 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) unterschreitet, berechnet (KERSEBAUM et al., 1993). Unterhalb der definierten Profilmächtigkeit wird unterstellt, dass die Bodenart der letzten Schicht im Profil bis zum Grundwasserspiegel nicht mehr wechselt und für die tieferen Bodenkompartimente *steady state* Bedingungen gelten.

Notwendig für die Berechnung des Wasserhaushalts ist neben dem täglichen Niederschlag auch das Sättigungsdefizit der Luft um 14 Uhr. Diese wird zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration ( $ET_{pot}$ ) nach einem einfachen Verfahren von HAUDE (1955) unter Einbeziehung von pflanzenspezifischen Monatsfaktoren (HEGER, 1978) verwendet. Die potentielle Evaporation ( $E_{pot}$ ) wird aus der potentiellen Evapotranspiration in Abhängigkeit vom Blattflächenindex (BFI) berechnet (GOUDRIAAN, 1977):

$$E_{pot} = ET_{pot} * e^{-0.5*BFI} \quad (3.1)$$

Der volumetrische Wassergehalt bei Feldkapazität ( $\Theta_{FK}$ ) gilt als Obergrenze für die Aufsättigung. Eine darüber hinausgehende Infiltration wird als Sickerwasser abgeführt. Als untere Grenze bei Entleerung durch Evaporation werden 30 % des Wassergehaltes beim Permanenten Welkepunkt (PWP) angenommen. Nach VAN KEULEN (1975) entspricht dies in etwa der Austrocknungsgrenze von Böden.

### 3.2 Beschreibung des Nitrattransports

Die Simulation der Nitratbewegung im Boden erfolgt mit Hilfe der Konvektions-Dispersionsgleichung für instationäre Bedingungen (siehe Kap. 2.2, Gleichung 2.1).

Wie in Kap. 3.1 erwähnt, erfolgt die Berechnung der Wassergehalte und Flüsse als Funktion der Tiefe und der Zeit im Wassermmodell. Diese werden zur numerischen Lösung von Gleichung 2.1 nach einem expliziten *Finite Differenzen-Verfahren* verwendet.

### 3.3 N-Transformation

#### 3.3.1 Teilmodell N-Mineralisation

Der Modellteil zur N-Mineralisation folgt dem Konzept der Netto-N-Mineralisation und simuliert die Freisetzung von mineralischem Stickstoff aus zwei unterschiedlich schnell abbaubaren N-Fractionen (MOLINA et al., 1980; RICHTER et al., 1982; LÜTTICH, 1987).

Danach ergibt sich die in der Zeit (t) mineralisierte Stickstoffmenge ( $N_{\min}$ ) aus:

$$N_{\min}(t) = N_{\text{slow}} * (1 - e^{-k_{\text{slow}}(T, \Theta) * t}) + N_{\text{fast}} * (1 - e^{-k_{\text{fast}}(T, \Theta) * t}) \quad (3.2)$$

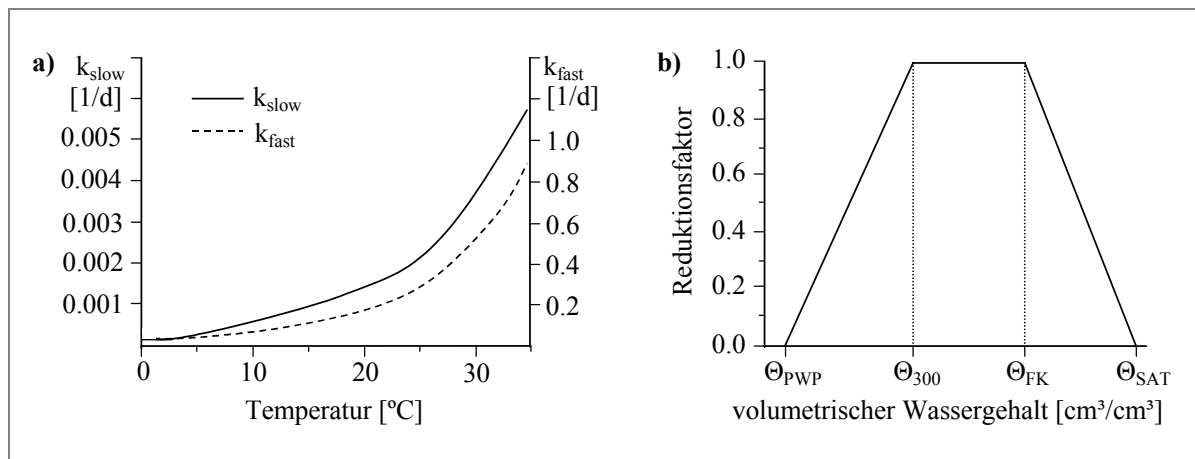
$N_{\text{slow}}$  stellt das Mineralisationspotential einer langsam abbaubaren Stickstofffraktion dar, das von NUSKE (1983) mit ca. 13 % des Gesamtstickstoffs angegeben wird. Dieser N-Pool setzt sich aus dem am Umsatz beteiligten Teil der organischen Bodensubstanz sowie schwer zersetzbaren Pflanzenrückständen (z.B. Stroh) und organischen Festdüngern (z.B. Mist) zusammen. Das Mineralisationspotential der schnell umsetzbaren Stickstofffraktion ( $N_{\text{fast}}$ ) besteht aus leicht abbaubaren Stickstoffverbindungen (z.B. frische Ernterückstände). Die Abhängigkeit der Mineralisationskoeffizienten ( $k_{\text{slow}}$  und  $k_{\text{fast}}$ ) von der Temperatur (= Tagesmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe) wird durch zwei *Arrhenius-Funktionen* (NUSKE, 1983, NORDMEYER & RICHTER, 1985) beschrieben.

Für  $N_{\text{slow}}$  gilt:  $k_{\text{slow}}(t) = 4.0 * 10^9 * e^{-8400 / (T+273)}$  (3.3)

und für  $N_{\text{fast}}$  gilt:  $k_{\text{fast}}(t) = 5.6 * 10^{12} * e^{-9800 / (T+273)}$  (3.4)

Bei Temperaturen  $< 0^\circ\text{C}$  wird angenommen, dass keine Mineralisation mehr erfolgt (AHRENS, 1985).

Der Einfluss der Bodenfeuchte auf die Mineralisation wird durch Korrektur der Mineralisationskoeffizienten mit einem von MYERS et al. (1982) abgeleiteten Reduktionsfaktor berücksichtigt. In der folgenden Abbildung sind grafisch der Einfluss der Temperatur (Abb. 3.3, a) und des Wassergehaltes (Abb. 3.3, b) auf die N-Mineralisation dargestellt. Im Modell wird die N-Mineralisation auf die oberen 3 dm des Bodens begrenzt, da der behinderte Gasaustausch unterhalb von 3 dm die biologische Aktivität deutlich einschränkt.



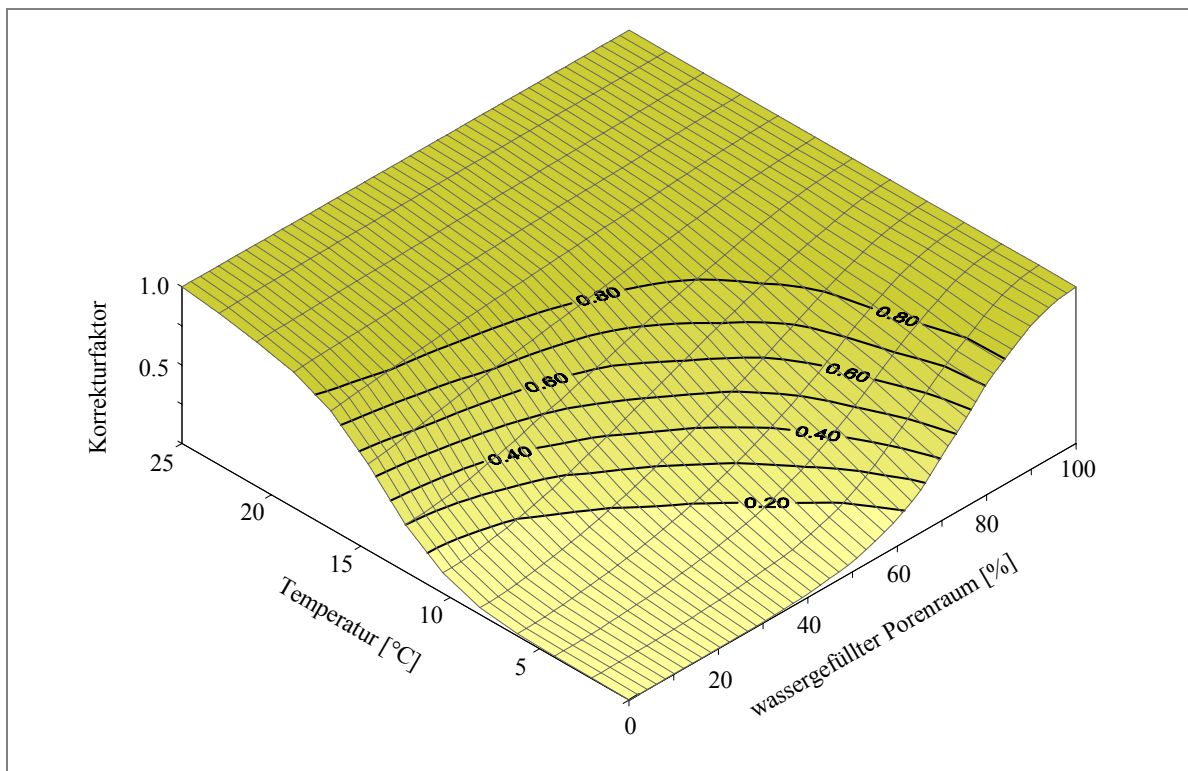
**Abb. 3.3:** Darstellung der N-Mineralisation in Abhängigkeit von Temperatur (a) und Wassergehalt (b) (nach Angaben von KERSEBAUM, In: SHAFFER et al., 2001)

Die Berechnung des  $N_{\text{slow}}$ -Mineralisationspotentials erfolgt im Modell aus dem Gesamtstickstoffgehalt des Bodens. Das  $N_{\text{fast}}$ -Potential ergibt sich aus der Höhe der Ernterückstände. Die Menge der Residuen wird mit Hilfe von mittleren Blatt-/Wurzel- bzw. Stroh-/Korn- Verhältnissen und mittleren Stickstoffgehalten (RUHR-STICKSTOFF, 1993) aus der Ertragshöhe der Vorrucht ermittelt. Bei Abfuhr des Nebenernteguts wird angenommen, dass etwa 15 % als Stoppel- und Wurzel(ernte)rückstände auf dem Acker verbleiben. Weiter wird unterstellt, dass der Anteil der schnell mineralisierbaren N-Fraktion für Getreidestroh gleich 0 ist (VILSMEIER & AMBERGER, 1981; GUTSER & VILSMEIER, 1985). Für Rübenblatt gelten 50 % des Stickstoffgehaltes als leicht abbaubar (NORDMEYER, 1985) und bei Grün- düngung sogar 60 % (VILSMEYER & AMBERGER, 1981).

### 3.3.2 Abschätzung der Stickstoffverluste und -einträge

Gasförmige Stickstoffverluste werden im wesentlichen durch Denitrifikation und Ammoniak-Entbindung hervorgerufen. Für mineralische und organische Düngemittel werden mittlere Ausbringungsverluste von 15 % des Ammonium- bzw. Harnstoffanteils im Dünger durch das Modell veranschlagt. Die Ausbringungsverluste bei organischen Düngern (z.B. Gülle) können bei verzögerter Einarbeitung, einer Sättigungskurve folgend, in einem Zeitraum von 10 Tagen bis auf 90 % des Ammoniumanteils ansteigen (DÖHLER & ALDAG, 1986; AMBERGER et al. 1987; SALOW, 1996; VANDRÈ, 1997).

Die Denitrifikation wird mit Hilfe eines einfachen Modellansatzes von RICHTER & SÖNDGERATH (unveröffentlicht, zitiert in SCHNEIDER, 1991) berechnet. Die tägliche Denitrifikationsrate ( $N_{\text{den}}$ ) wird für den Oberboden in Abhängigkeit vom Nitratgehalt durch Verwendung einer Michaelis-Menten-Kinetik simuliert, die wiederum abhängig von den Reduktionsfunktionen des wassergefüllten Porenraums ( $\Theta_r$ ) und der Temperatur ( $T$ ) ist (Abb. 3.4).



**Abb. 3.4:** Modifikation der Denitrifikationsrate in Abhängigkeit von Temperatur und wassergefülltem Porenraum



Das entsprechende Gleichungssystem lautet:

$$N_{den} = \frac{V_{\max} * (NO_3)^2}{(NO_3)^2 + K_{NO_3}} * f(\Theta_r) * f(T) \quad (3.5)$$

mit  $f(\Theta_r) = 1 - e^{-\left(\frac{\Theta_r}{\Theta_{krit}}\right)^6} \quad (3.6)$

und  $f(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{T_{krit}}\right)^{4.6}} \quad (3.7)$

Die kritischen Werte für Temperatur ( $T_{krit}$ ) und für das wassergefüllte Porenvolumen ( $\Theta_{krit}$ ) liegen bei 15.5 °C bzw. 76.6 cm<sup>3</sup>/100 cm<sup>3</sup> und wurden von SCHNEIDER (1991) übernommen.

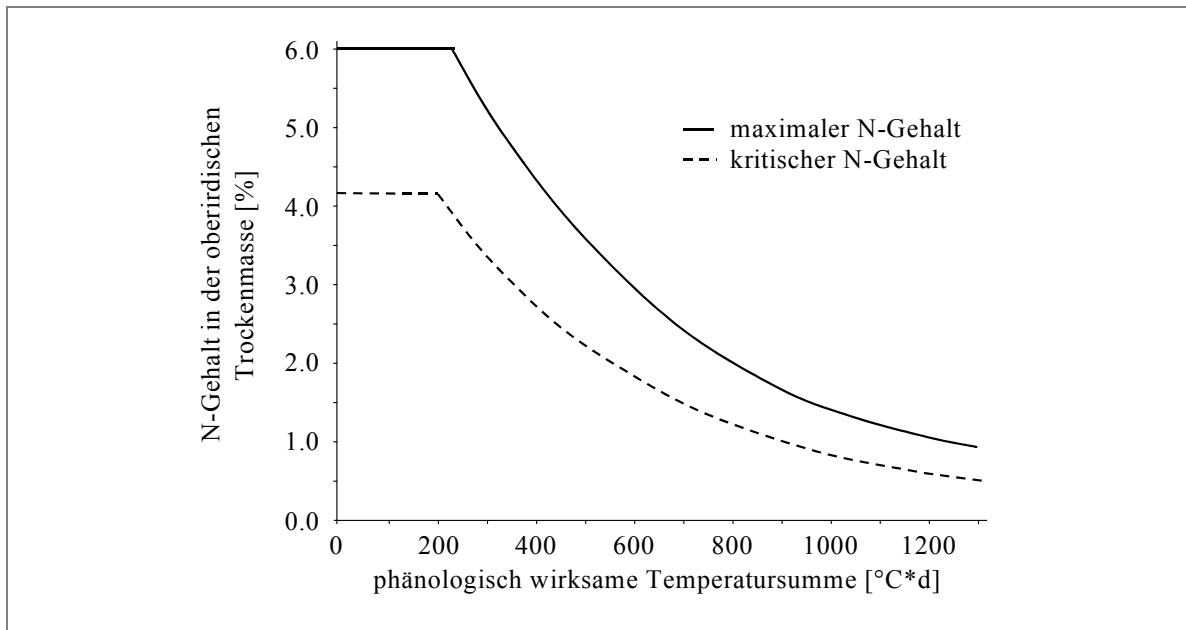
Die atmosphärischen N-Einträge werden im Modell einheitlich mit 30 kg N/ha/a angenommen und gleichmäßig übers Jahr verteilt.

### 3.4 Beschreibung des Teilmodells Pflanzenwachstum

#### 3.4.1 Trockenmasseproduktion

Das Teilmodell Pflanzenwachstum simuliert auf Basis von Sonneneinstrahlung und Temperatur die tägliche Nettotrockenmassebildung als Resultat von Photosynthese und Atmung. Die Grundlage für diesen einfachen Ansatz bildet das Modell *SUCROS* von VAN KEULEN et al. (1982). Der Blattflächenindex, der die Schnittstelle zwischen Pflanze und Atmosphäre darstellt, wird unter Verwendung eines konstanten Verhältnisses von Blattfläche zu Blattgewicht von 0.002 ha/kg TM (AASE, 1978) aus dem Blattgewicht berechnet. Die Lichtinterception im Bestand wird in Abhängigkeit vom Blattflächenindex durch ein Gleichungssystem von GOUDRIAAN (1982) beschrieben. Die Aufteilung der assimilierten Kohlenstoffverbindungen auf die unterschiedlichen Pflanzenorgane erfolgt in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Pflanze. Die Verteilungskoeffizienten werden aus Angaben von WEIR et al. (1984) und GROOT (1987) abgeleitet.

Zum einen kann Wasserstress aber auch Stickstoffmangel die Trockenmasseproduktion limitieren. Durch einen Reduktionsfaktor, der dem Quotienten aus aktueller und potentieller Transpiration entspricht (GROOT, 1987), wird Wasserstress bei der Photosyntheseleistung berücksichtigt. Von Stickstoffmangel wird gesprochen, wenn der N-Gehalt im oberirdischen Pflanzenteil ( $N_{ob}$ ) einen kritischen N-Gehalt ( $N_{krit}$ ) unterschreitet. Der kritische N-Gehalt variiert von Pflanzenart zu Pflanzenart und ist abhängig vom jeweiligen Entwicklungsstadium der Pflanze, wie Abb. 3.5 zeigt.



**Abb. 3.5:** Darstellung des maximalen und des kritischen N-Gehalts in der oberirdischen Trockenmasse in Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung des Winterweizens (nach Angaben von VIELEMEYER et al. (1983) und RITCHIE et al. (1988), In: KERSEBAUM, 1989)

Das Ausmaß der Wachstumsreduktion wird in Abhängigkeit vom Grad der Unterschreitung des kritischen Wertes abgeschätzt. Ab einem N-Gehalt von  $\leq 0.5$  % in der oberirdischen Trockenmasse (TM) findet kein Wachstum mehr statt. Berechnet wird der Reduktionsfaktor für die TM-Bildung ( $W_{red}$ ) nach:

$$W_{red} = (1 - e^{\frac{1}{(NF-1)}})^2 \quad (3.8)$$

mit

$$NF = \frac{(N_{ob} - 0.5)}{(N_{krit} - 0.5)} \quad (3.9)$$

Ein Teil des assimilierten Kohlenstoffs wird für die Erhaltungssatmung der Pflanzen benötigt. Bei der verbleibenden Assimilatmenge wird angenommen, dass 30 % für die Wachstumsatmung verbraucht werden (VAN KEULEN et al., 1982).

Im Modell wird neben Wasser- und Stickstoffmangel aber auch zeitweiliger Luftmangel durch Staunässe als Stressfaktor in Anlehnung an SUPIT et al. (1994) berücksichtigt.

### 3.4.2 Wurzelverteilung

Die Wurzelverteilung bildet die Schnittstelle zwischen Pflanze und Boden. Die Verteilung der Wurzelmasse über die Tiefe wird mit Hilfe eines empirischen Ansatzes (GERWITZ & PAGE, 1974) beschrieben, die die zeitliche Veränderung der Wurzelverteilung in Abhängigkeit von der Temperatursumme ab der Aussaat berücksichtigt (WHITMORE & ADDISCOTT, 1987). Die maximale Durchwurzelungstiefe wird über die Bodenart nach KA4 (AG BODEN, 1994) abgeleitet und begrenzt das Wurzelwachstum in die Tiefe. Bei der Umrechnung auf Wurzelfläche bzw. -länge wird in Anlehnung an BARRACLOUGH (1986) ein TM-Gehalt von 7 %, ein spezifisches Gewicht der Wurzelfrischmasse von 1 g/cm<sup>3</sup> und ein

mittlerer Wurzelradius ( $r_w$ ) von 0.15 mm angenommen. Die Stickstoffaufnahme über die Wurzeln wird im Modell durch eine maximale Aufnahmefähigkeit pro cm Wurzellänge definiert. Für die Zeit bis zur Blüte wird eine maximale Aufnahmefähigkeit von  $30 \cdot 10^{-14}$  mol/cm Wurzel/s (BARRACLOUGH, 1986) angenommen, nach der Blüte nimmt die Aufnahmefähigkeit mit zunehmender Entwicklung bis auf  $23 \cdot 10^{-14}$  mol/cm Wurzel/s ab.

### 3.4.3 Stickstoffaufnahme

Dem simulierten N-Bedarf bzw. der maximalen N-Aufnahmerate steht das N-Angebot im Boden gegenüber. Der Nitrat- und der Wassergehalt in den einzelnen Tiefenschichten ergibt sich aus den Simulationen der Unterprogramme. Der Transport an die Wurzel erfolgt entweder durch Diffusion oder durch Konvektion mit dem Transpirationsstrom. Die N-Aufnahme erfolgt ausschließlich in Form von Nitrat. In einem vereinfachten Ansatz wird zunächst die N-Anlieferung durch den Transpirationsstrom ( $N_{mas}$ ) berechnet nach:

$$N_{mas} = \sum_{i=1}^{ZW} TP_i * c_i * \Delta z * \Delta t \quad (3.10)$$

Reicht die N-Anlieferung durch Konvektion nicht aus, wird zusätzlich der maximal durch Diffusion ( $N_{dif}$ ) mögliche Antransport nach einer Gleichung von BALDWIN et al. (1973) bestimmt:

$$N_{dif} = \sum_{i=1}^{ZW} N_{dif_i} = \sum_{i=1}^{ZW} 2 * \pi * r_w * WD_i * D \frac{(c_i - c_{min})}{r_i} * \Delta z * \Delta t \quad (3.11)$$

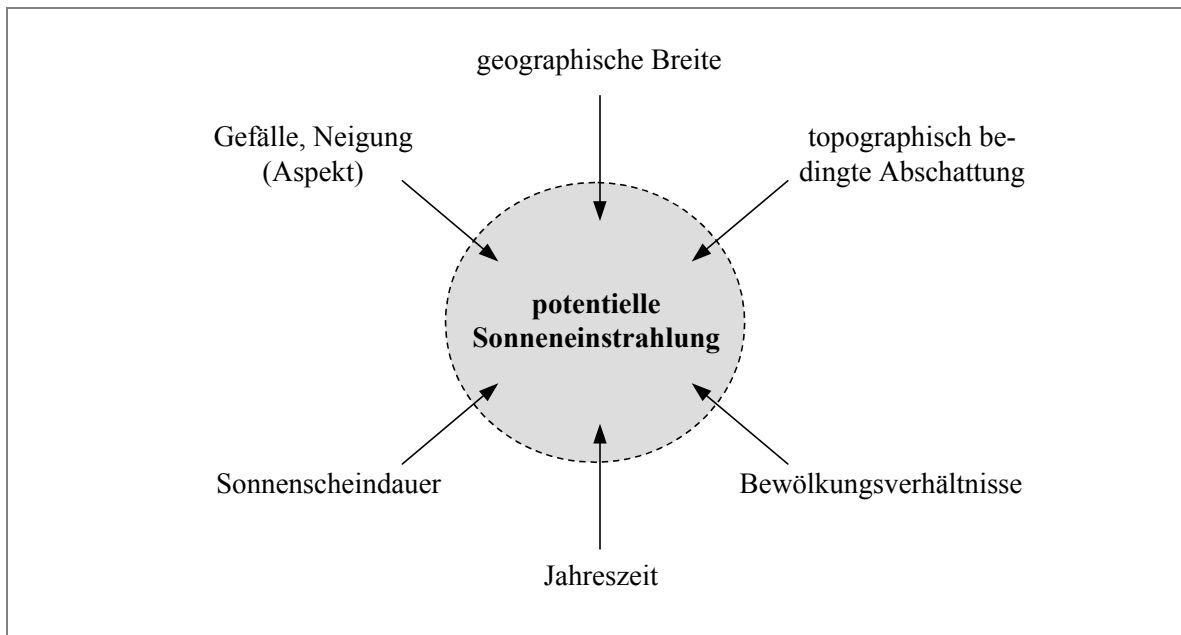
wobei  $r_i (= [\pi * WD_i]^{-0.5})$  die halbe Distanz zwischen benachbarten Wurzeln bei Annahme einer gleichförmigen Verteilung ist. Damit wird angenommen, dass der Wurzel Nährstoffe aus einem Bodenzylinder mit einem Radius ( $r_i$ ) zur Verfügung stehen. Der maximale Konzentrationsgradient ergibt sich aus der aktuellen Konzentration in der Bodenlösung und einer angenommenen Minimalkonzentration ( $c_{min}$ ) an der Wurzeloberfläche von 1  $\mu$ mol/l (HAGIN et al., 1984). Liegt die maximale Anlieferung unter dem noch zu deckenden Bedarf ist die aktuelle Aufnahme je Kompartiment gleich der maximalen Anlieferung ( $N_{max_i}$ ). Andernfalls wird die Aufnahme zur Deckung des Pflanzenbedarfs entsprechend dem Anteil der Kompartimentdiffusion am gesamten maximalen Diffusionsantransport über die Durchwurzelungstiefe auf die Schichten verteilt.

### 3.4.4 Pflanzenentwicklung

Die Pflanzenentwicklung wird im Modell über einen Temperatursummenansatz von WEIR et al. (1984) beschrieben, der den Entwicklungszyklus der Pflanze in mehrere Phasen unterteilt. Um die erste Phase (Keimung) auszulösen, wird eine bestimmte Temperatursumme (*Keimtemperatursumme oder Keimschwelle*) bei ausreichender Bodenfeuchte benötigt. Die daran anschließenden Wachstumsphasen beziehen neben der Temperatur auch die Tageslänge und die Erfüllung der Vernalisationsansprüche mit ein. Dieser Ansatz wird mit einem separaten Parameter-File für jede Pflanzenart gekoppelt.

### 3.5 Zusatztool zur Beschreibung der Sonneneinstrahlung (SRAD)

Die Hauptenergiequelle für alle auf der Erde wachsenden Pflanzen ist die Sonne. Wie schon in Kap. 3.4 erwähnt, spielt die direkte und indirekte Einstrahlung von der Sonne bei der Beschreibung des Pflanzenwachstums eine nicht unbeträchtige Rolle. Im Gelände kann die Summe der eingestrahnten Energie am Punkt durch das Relief bzw. umstehende Gebäude oder Bäume beeinflusst werden (Abb. 3.6; WILSON & GALLANT, 2000; REUTER et al., 2001).



**Abb. 3.6:** Darstellung der Faktoren, die die potentielle Strahlung beeinflussen

Je nach Reliefposition verändert sich der Betrag der Abschattung innerhalb eines Jahres und führt zu räumlichen Unterschieden bei Einstrahlung und Temperatur (REUTER et al., 2001). Besonders in stark reliefierten Gebieten (z.B. im Berg- und Hügelland) führt eine zeitweilige Abschattung zur Ertragsminderung. Diese Überlegungen führten GALLANT & WILSON (1996) zur Entwicklung des SRAD-Moduls (*Solar Radiation*) für das Programmpaket TapesG.

Um das Modul auf eine bestimmte Region anwenden zu können, benötigt man ein digitales Geländemodell (DGM), um für jeden Geländepunkt seine spezielle Reliefposition berechnen zu können. Dabei hat sich die Aufteilung in quadratische Rasterzellen (sog. *Gridzellen*) bewährt. Das Modul SRAD nutzt die unbeschattete Gridzelle als Standard. Die Ausgabe der reduzierten Einstrahlung erfolgt in Form von Monatsfaktoren für jede Gridzelle. Über eine Zusatzfunktion im N-Modell HERMES lässt sich das SRAD-Modul jederzeit zu- oder abschalten.

4 Material und Methoden

4.1 Charakterisierung der Untersuchungsgebiete

4.1.1 Lage und Geologie

Die Lage der Untersuchungsgebiete wird in Abb. 4.1 zusammen mit Kenngrößen zum Relief, der Geologie und den Leit- und Begleitböden dieser Region näher dargestellt. Die fünf Standorte verteilen sich unregelmäßig über die Bodenregionen in Deutschland. Es werden nicht alle wichtigen Bodengroßlandschaften erfasst. Die Jungmoränengebiete im Norden, wie auch die Berg- und Hügellandschaften sind stark übergewichtet, während die landwirtschaftlich bedeutenden Flusslandschaften oder Marsche und Moore unberücksichtigt bleiben. Ein weiterer Standort liegt im Lössgebiet der sachsen-anhaltinischen Sandlössbörde.

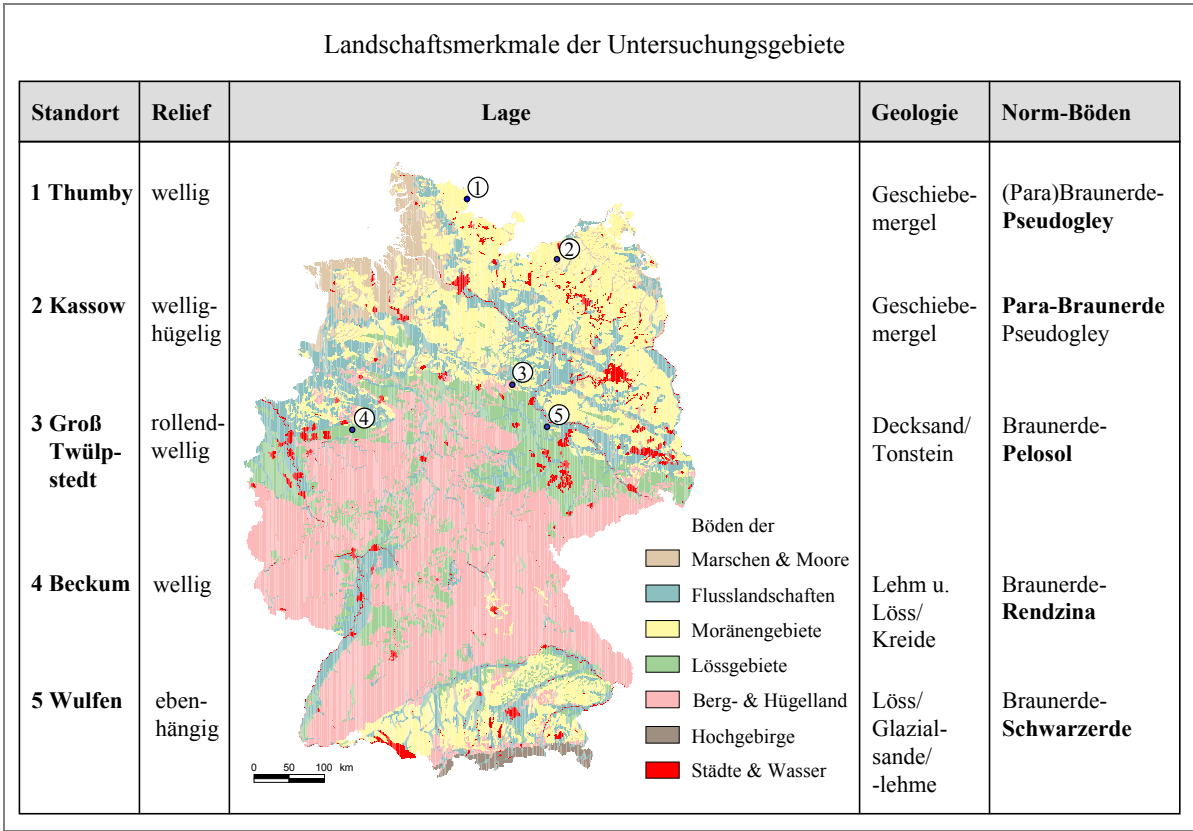


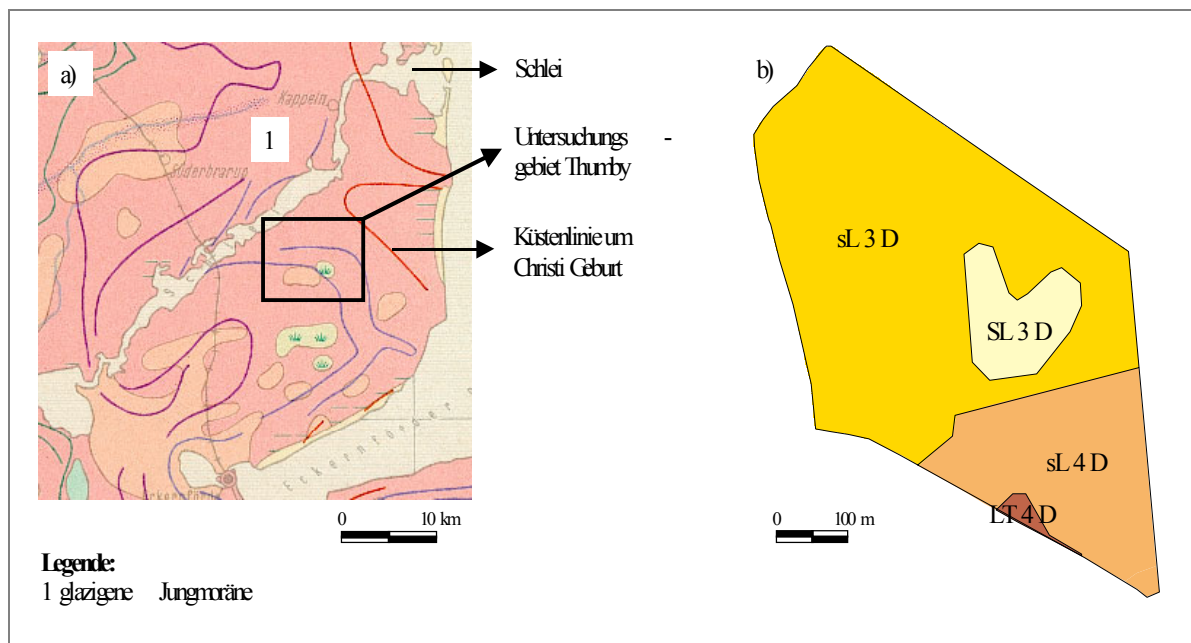
Abb. 4.1: Bodenübersichtskarte (BÜK 1000; KIESEL, 2002) mit den Bodenregionen und der Lage der Untersuchungsbetriebe

### 4.1.2 Boden und Relief

Die Jungmoränenlandschaften von Thumby (Schleswig-Holstein) und Kassow (Mecklenburg-Vorpommern) unterscheiden sich geomorphologisch und bodenkundlich relativ stark voneinander.

#### a) Thumby

Das Ausgangssubstrat für die Endmoräne in Thumby bilden Geschiebemergel, die z.T. bis an die Oberfläche anstehen, teilweise aber auch flächig von glazilimnisch, glazifluviatilen sowie äolischen Geschiebesanden überlagert werden (HERBST, 2002). Die glazialen Ablagerungen der Jungmoräne (Abb. 4.2, a) werden durch Moränensande und Lehme bzw. Schmelzwassersande und glazifluviatile Lockersedimente, die flächig das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung stellen, geprägt.



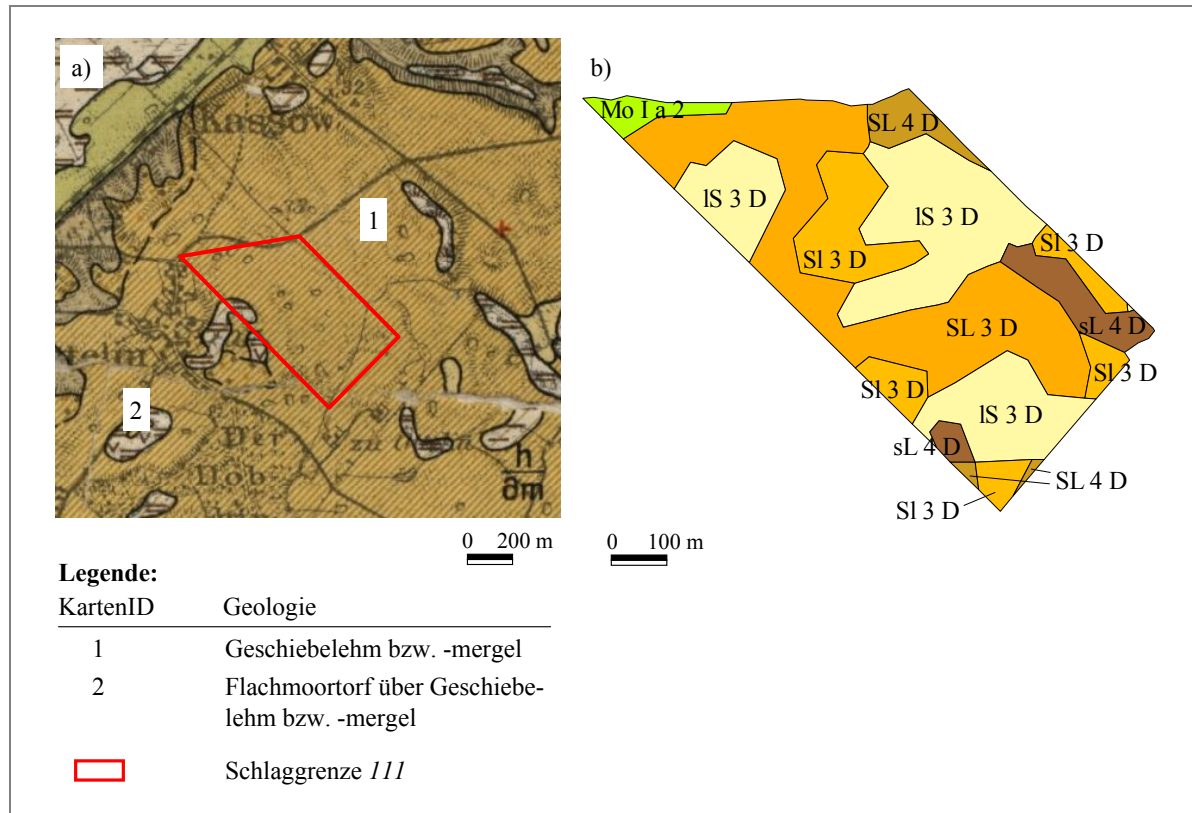
**Abb. 4.2:** a) Ausschnitt aus der geologischen Karte (GÜK 500) von STREMMER (1981) über das Untersuchungsgebiet Thumby, b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag *Feldscheide-links*

Die sehr kleinräumige pedotaxonomische Diversität (MUTERT, 1978) der ostholsteinischen Hügellandschaft erfordert eine räumliche Beschreibung auf dem Niveau von Leitboden- und Begleitbodengesellschaften. Als Leitböden für dieses Gebiet werden Parabraunerden sowie Parabraunerde-Pseudogley-Vergesellschaftungen (STREMMER, 1981) angegeben. Auf den Schlägen rund um Thumby findet man vorrangig primäre Pseudogleye, die durch lehmig-tonige Moränenablagerungen im Untergrund zu Staunässe neigen.

Der hier untersuchte Schlag *Feldscheide-links* (23.2 ha) weist eine homogene Bodentextur auf. Im nordwestlichen Teil hat sich großflächig eine flache Senke ausgebildet. Die Höhenunterschiede auf dem leicht gewellten Schlag sind < 5 m (Tab. 4.1). Die durchschnittliche Bodenzahl liegt bei 59 Bodenpunkten und variiert auf dem Gesamtschlag zwischen 54 und 60. Pseudogleye prägen den drainierten Schlag, auf dem fast ausschließlich sandige Lehme zu finden sind (Abb. 4.2, b). Typisch für diese Gegend sind sog. *Sölle*, die auch auf Schlag *Feldscheide-links* vorkommen.

### b) Kassow

Nach GEBBERS (1997) ist die Moräne im Gebiet um Kassow noch der Grundmoräne des Pommerschen Stadiums zuzuordnen, die hier von mehr oder weniger mächtigen schluffig-sandigen Deckschichten überlagert wird. Die sandigen Deckschichten in Kassow sind glazilimnischen, glazifluviatilen oder äolischen Ursprungs (GEBBERS, 1997). In diesem Gebiet stehen großflächig Braunerden aus sandig-schluffigem Material mit einer sehr kleinräumig variierenden Mächtigkeit von > 15 dm an (SCHMIDT, 1982). In Deflationsbereichen (Kuppen, Hängen) findet man nur geringmächtige Deckschichten, so dass oberflächennah Geschiebelehme und lokal auch Geschiebemergel anstehen (Abb. 4.3, a).



**Abb. 4.3:** a) Ausschnitt aus der geologischen Karte (GÜK 100) von HECK (1960) über das Untersuchungsgebiet Kassow, b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag III

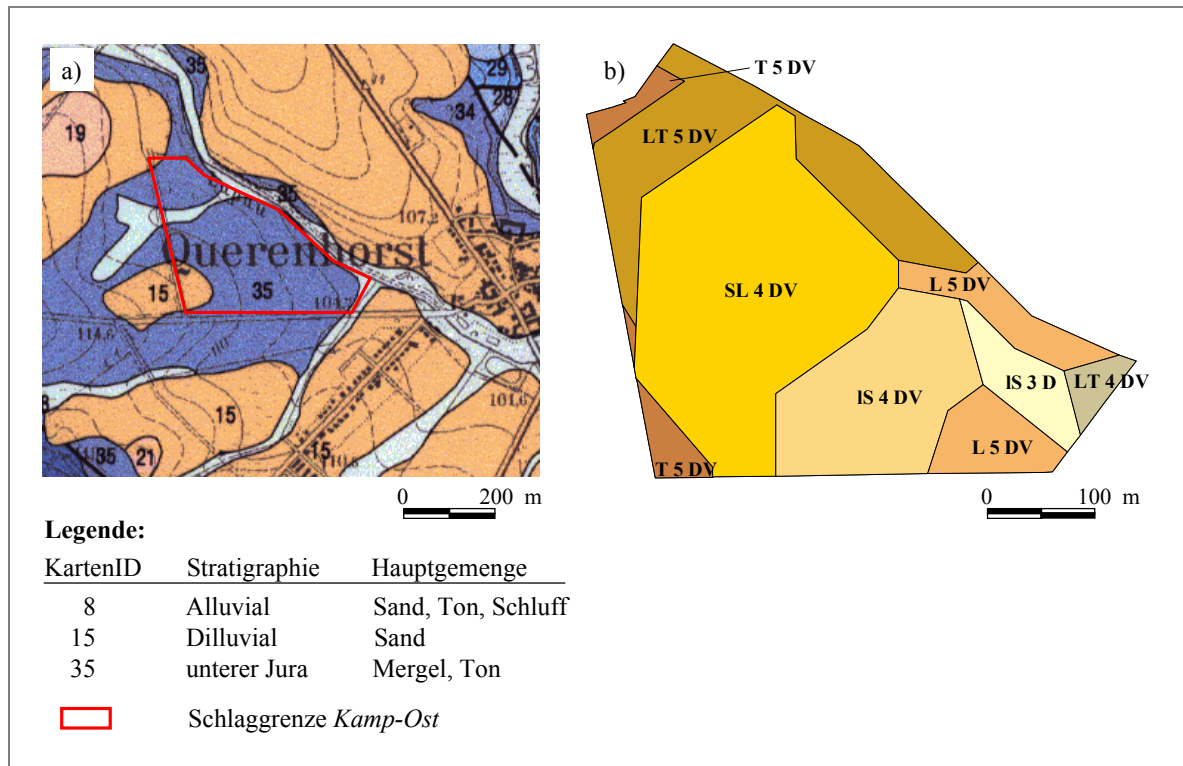
In dieser Region werden häufig Pseudogleye oder Parabraunerden lokal auch Pararendzinen angetroffen. Das leicht erodierbare Deckmaterial führt stellenweise zu sehr ausgeprägten Erosionsrinnen, in deren unterem Bereich sich mächtige Kolluvisole ausbilden. Häufig findet man in Senken Sölle, die lokal von Gleyen, Anmooren oder Mooren umgeben sind (HERBST, 2002).

Aus dem 35.0 ha Schlag III wurde eine repräsentative Fläche von 12.0 ha für die Beprobung ausgewählt und als Schlagteil III-3 bezeichnet. Der nördliche Schlagteil von III-3 ist deutlich stärker reliefiert (Höhenunterschiede:  $\leq 4$  m) als der südliche. Die Bodentypen schwanken auf dem Schlagteil kleinräumig sehr stark zwischen Braunerden, Parabraunerden bis hin zu Braunerde-Pseudogleyen und Kolluvien, die sich in Erosionsrinnen und Senken gebildet haben. Auf Schlag III-3 finden sich schwach bis stark schluffige bzw. schwach bis stark lehmige Sande (Abb. 4.3, b). Die durchschnittliche Bodenzahl aller Bodenareale liegt bei 49, schwankt aber zwischen 35 und 56 Bodenpunkten (Tab. 4.1). Sehr typisch für diesen drainierten Teilschlag sind die vielen Sölle, die sich unregelmäßig auf der Fläche verteilen.



### Groß Twülpstedt

Das Untersuchungsgebiet Groß Twülpstedt (Niedersachsen) wird durch Verwitterungs- und Glazialdecken über Tonstein (aus dem Jura) und von Altmoränensedimenten geprägt (Abb. 4.4, a). Die daraus entstandenen Pelosole weisen eine sehr dichte Lagerung auf und neigen zu Haftnässe (GROBE & NIKLASCH, 1976). Moränensande und Lehme bilden in diesem Gebiet die Basis für Braunerden und Pseudogleye.



**Abb. 4.4:** a) Ausschnitt aus dem geologischen Kartenblatt Groß Twülpstedt (GK 25) von MEST-WERDT (1914), b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag *Kamp-Ost*

Die sandig-lehmigen Substrate auf Schlag *Kamp-Ost* prägen Gleye, Pseudogleye und Pelosole. Im westlichen Teil des Schlags sind großflächig sandige bis tonige Lehme anzutreffen (Abb. 4.4, b). Trotz Drainage zählt der Schlag nicht zu den günstigen Ackerstandorten, da Haft- und Staunässe die Befahrbarkeit einschränken. Erschwerend kommt noch ein hoher Tonsteingehalt besonders im Oberboden (0 - 3 dm) hinzu, der sich ungleichmäßig über den Gesamtschlag verteilt. Das wellige Relief auf dem 12.0 ha großen Schlag weist Höhenunterschiede von bis zu 8 m auf (Tab. 4.1). Die Bodenzahlen schwanken zwischen 40 und 60.

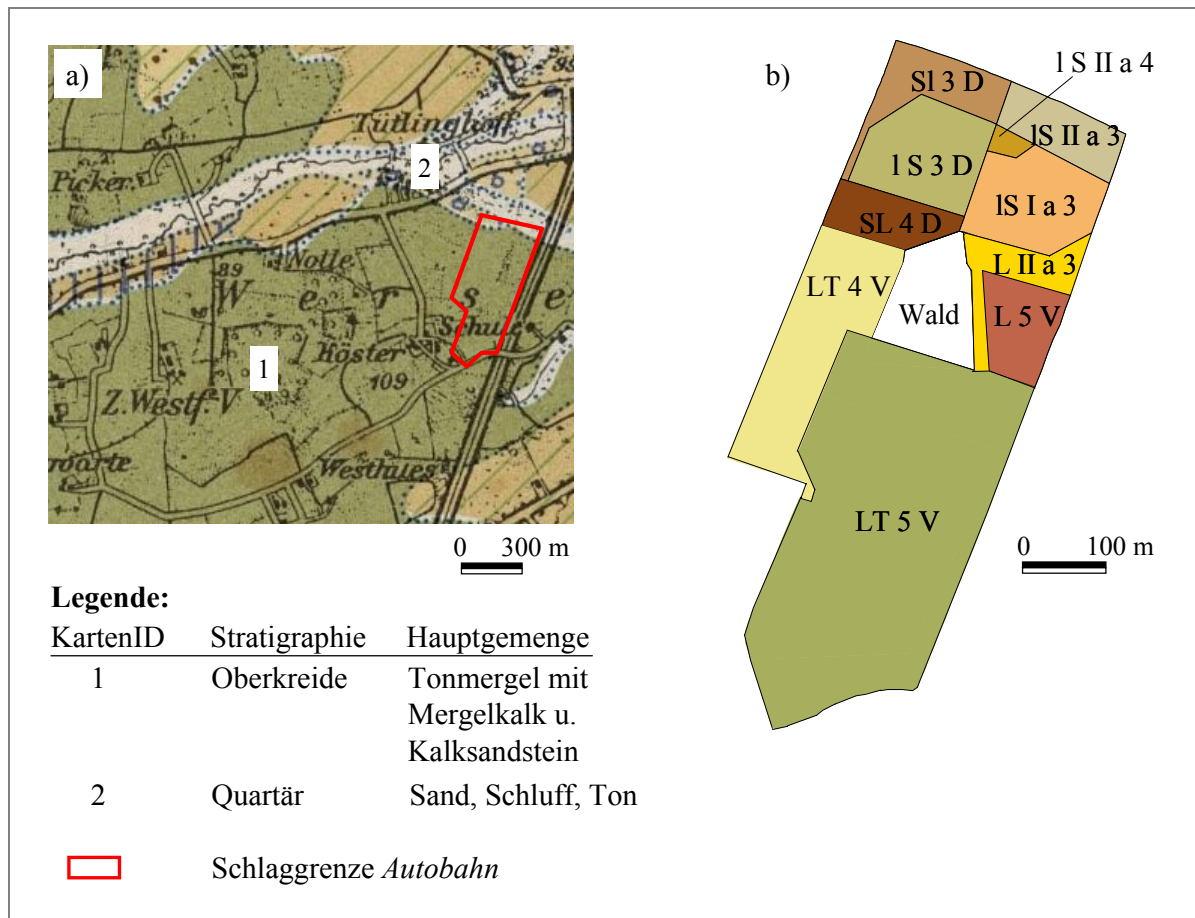
### Beckum

Die in der Münsterländer Tieflandsbucht (Nordrhein-Westfalen) gelegenen Beckumer Böden prägt eine Kalksteinschicht, die sich während der Kreidezeit ausgebildet hat (SKUPIN & STAUDE, 1995). Meist wird dieser Kalkstein oder -mergel überdeckt von glazialen Deckschichten aus Sand und Lehm mit unterschiedlicher Mächtigkeit (Abb. 4.5, a).

Eiszeitliche Moränensande und -lehme bilden die Grundlage für die typischen, leicht pseudovergleyten Braunerden an den Unterhängen. Die Verwitterungstone, die mit glazialen Flugsanden als lehmig-tonige Deckschicht anstehen, variieren sehr kleinräumig über mehr oder weniger stark verwittertem Kalkstein (MERTENS, 1976). Charakteristische Bodentypen für diese Gegend sind leicht pseudovergleyte Rendzinen und Braunerde-Rendzinen,



die meist großflächig zu finden sind. Die Rendzinen haben häufig nur gering mächtige Bodenauflagen mit Kalksteinresten und werden durch mehr oder weniger stark ausgeprägte Staunässe gekennzeichnet (DAHM-AHRENS, 1995).



**Abb. 4.5:** a) Ausschnitt aus der geologischen Karte (GÜK 100) von ARNOLD (1959) über das Untersuchungsgebiet Beckum, b) Karte der Reichsbodenschätzung vom Schlag *Autobahn*

In diesem Gebiet wird der Schlag *Autobahn* beprobt. Der 20.2 ha Schlag fällt in nördlicher Richtung sehr gleichmäßig von 106 m ü. NN im Süden auf 91 m ü. NN im Norden ab und weist von allen Untersuchungsstandorten die größten Höhenunterschiede auf (Tab. 4.1). Im südlichen Teil des Schlages findet man Rendzinen, die im mittleren Teil in Braunerde-Rendzinen und im nördlichen Teil in Braunerde-Pseudogleye übergehen. Die Bodentypen sind hier stark reliefabhängig. Unter dem *Ap*-Horizont steht im südlichen Bereich der Fläche eine massive Kalkmergelschicht an, die im nördlichen Schlagteil unter 20 dm absinkt. Der Kalkmergel und Fragmente aus dieser Schicht führen in bestimmten Schlagbereichen zu einem sehr hohen Steingehalt im Oberboden.

Neben schwach bis stark lehmigen Sanden im nördlichen Bereich der Fläche findet man im südlichen Teil schwach bis mittel tonige Lehme vor (Abb. 4.5, b). Im mittleren Schlagteil sind stellenweise auch schwach bis mittel sandige Lehme zu finden. Der Tongehalt nimmt sehr gleichmäßig von Norden (5 %) nach Süden (40 %) zu. Die Bodenzahlen schwanken zwischen 30 und 56. Während der südliche Teil des Schlages in den 70iger Jahren drainiert wurde, nutzte man den nordöstlichen Teil noch bis 1993 als Grünland.



**Tab. 4.1:** Übersicht über die Untersuchungsschläge zur Schlaggröße, Höhe, Relief, Bodenform und Bodenzahl

Standort	Schlagbezeichnung	Größe [ha]	Höhe [m ü. NN]		Relief	Bodenform	Bodenzahl		
			Min	Max			Min	Max	Spanne *
Thumby	<i>Feldscheide-links</i>	23.2	15	20	flach	Tieflehm-Pseudogley	54	60	6
Kassow	<i>III-3</i>	12.0	27	31	wellig (stark) wellig	Tieflehm-(Para-)Braunerde, Pseudogley	35	56	21
Groß Twülpstedt	<i>Kamp-Ost</i>	12.0	104	112	wellig	Tieflehm-Pelosol, Pseudogley	40	60	20
Beckum	<i>Autobahn</i>	20.2	91	106	eben-hängig	Lehm-Rendzina, Braunerde	30	52	22
Wulfen	<i>Finkenherd</i>	45.1	70	75	eben-leicht hügelig	Löss-Schwarzerde, Braunerde	48	86	38

Bemerkung: \*) Spannweite der Bodenzahlen

### 4.1.3 Klima und Witterungsverlauf

Da Klimadaten lokal stark schwanken können (SCHULTZ, 1997), wurden im Herbst 1999 auf den Projektbetrieben lokale Wetterstationen eingerichtet, um genauere Daten zum lokalen Wettergeschehen zu erhalten.

Ein Vergleich der Untersuchungsstandorte über den Zeitraum von 2000 bis 2002 zeigt deutliche Abweichungen im Vergleich mit den langjährigen Mitteln des Deutschen Wetterdienstes (DWD) von 1961 bis 1990 bei der mittleren Jahrestemperatur wie auch beim Jahresniederschlag (Tab. 4.2).

**Tab. 4.2:** Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag der Untersuchungsstandorte

Standort	Jahresmitteltemperatur				Jahresniederschlag				potentielle Verdunstung [mm] Mittel*
	[°C]				[mm]				
	Mittel*	2000	2001	2002	Mittel*	2000	2001	2002	
Thumby	8.6	9.9	9.1	9.9	670	548	762	1097	510
Kassow	8.2	10.4	9.4	--	600	612 <sup>a</sup>	642 <sup>a</sup>	--	550
Groß Twülp- stedt	8.4	9.9	9.0	9.4	600	464	664	1001	570
Beckum	9.3	11.4	10.6	11.3	800	727	948	1095	570
Wulfen	9.0	10.8	9.9	11.8 <sup>b</sup>	440	460	646	412 <sup>b</sup>	610

Bemerkung: \*) langjähriges Mittel von 1961 bis 1990 (MÜLLER-WESTERMEIER et al., 1997 & 2001)

<sup>a</sup>) Niederschlagsdaten der Station Oettelin

<sup>b</sup>) Wetterdaten nur bis 30.08.02

Die langjährigen Tagesmitteltemperaturen bewegen sich in den Untersuchungsgebieten im Bereich von 8.2 °C (Standort Kassow) und 9.3 °C (Standort Beckum). Die Ergebnisse der lokalen Messstationen zeigen über den Untersuchungszeitraum (2000 bis 2002) auf allen Standorten höhere Werte. Die Abweichungen der Jahrestemperaturen zum langjährigen Mittel betragen im Minimum 0.4 °C (Standort Groß Twülpstedt) und im Maximum 2.2 °C (Standort Kassow).

Die langjährigen Mittel weisen beim Niederschlag eine Spannbreite von 440 mm (Standort Wulfen) bis 800 mm (Standort Beckum) auf. Vergleiche mit den gemessenen Jahresniederschlagsmengen der lokalen Stationen zeigen, außer auf den Standorten Kassow und Wulfen, dass das Jahr 2000 relativ trocken war. In diesem Jahr liegt die Niederschlagsmenge deutlich unter dem langjährigen Mittelwert. 2001 hingegen muss als verhältnismäßig feucht eingestuft werden, da auf allen Standorten das langjährige Niederschlagsmittel, außer auf dem Standort Kassow, um mehr als 14 % überschritten wird. Auf den Standorten Groß Twülpstedt und Wulfen liegt die Niederschlagsmenge sogar 44 % über dem langjährigen Mittel. Wie schon erwähnt, nimmt der Standort Kassow bei der Niederschlagsmenge eine Ausnahmestellung ein. Seine maritime Lage führt nur zu geringen Schwankungen bei der Niederschlagsmenge. In 2002 fallen die Niederschlagswerte auf allen Standorten nochmals höher aus als in 2001. In den Untersuchungsgebieten Thumbby und Groß Twülpstedt liegen die Niederschlagsmengen 65 %, in Beckum immerhin noch 37 % über dem Mittel der langjährigen Messung. Das Untersuchungsjahr 2002 muss also als extrem feucht eingeschätzt werden. Für den Standort Wulfen liegen die Wetterdaten nur bis zum 30.08.02 vor. Eine Auswertung für das Gesamtjahr 2002 ist daher nicht möglich.

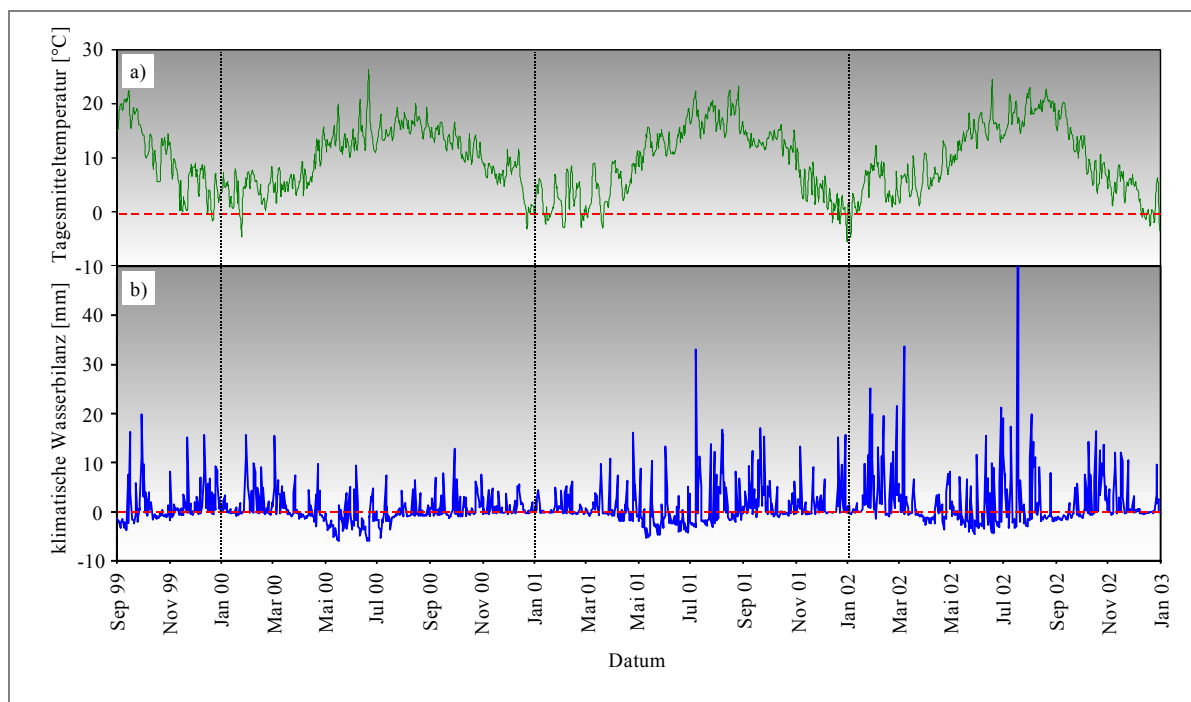
Bezieht man das langjährige Mittel der potentiellen Verdunstung in die Betrachtung mit ein, zeigen vier der fünf Standorte eine positive Wasserbilanz. Auf dem Standort Wulfen fällt die Wasserbilanz mit jährlichen Verdunstungsraten von 610 mm bei nur 440 mm Jahresniederschlag im langjährigen Mittel deutlich negativ aus.

Entscheidend für das Pflanzenwachstum sind aber die Temperaturen und der Wassergehalt im Boden während der Vegetationszeit. Wasserstress kann über längere Zeit im Bestand zu erheblichen Ertragsausfällen führen. Aus diesem Grund wird im folgenden die Wasserbilanz der Untersuchungsgebiete für die klimatische Bewertung herangezogen. Die Berechnung der potentiellen Verdunstung basiert im Programm HERMES auf einem nutzungsspezifischen Ansatz von HAUDE (1955).

### Thumby

Die klimatische Wasserbilanz von September 1999 bis Dezember 2002 wird aus Daten der Wetterstation Thumby (*preagro* 909), die ca. 1300 m südwestlich des Schlages *Feldscheide-links* liegt, ermittelt. In 2000 kommt es während der Vegetationsperiode von Ende April (25.04.00) bis Anfang Juli (07.07.00) zu einer relativ ausgeprägten Trockenphase mit einem Wasserdefizit von 141 mm (Abb. 4.7, b). Von April bis August fallen nur 167 mm Niederschlag. Im Folgejahr ist die Wasserbilanz deutlich ausgeglichener. Nur kurzzeitig ist Wasserstress zu beobachten, der das Pflanzenwachstum aber nicht wesentlich beeinflusst. Im Untersuchungsjahr 2002 führen die Niederschläge während der Winterperiode zu einem schnellen Auffüllen des Bodenwasserspeichers. 500 mm Niederschlag fallen von April bis August, Wasserstress tritt auch hier nur kurzfristig auf. Die hohen Niederschlagsmengen im Juli (181 mm) mit bis zu 88 mm am 18.07.02 führen zu hohen Ernteverlusten durch aufplatzen Rapsschotten. Für den ausgewerteten Untersuchungszeitraum von Januar 2000 bis Dezember 2002 wird ein Wasserüberschuss von 436 mm/a ermittelt (Abb. 4.12). Die relativ günstige Niederschlagsverteilung und die hohe positive Wasserbilanz im Zusammenwirken mit dem milden Seeklima und den großen Tages- bzw. Belichtungslängen im Sommer macht das Untersuchungsgebiet zu einer klimatisch bevorzugten Ackerbauregion.

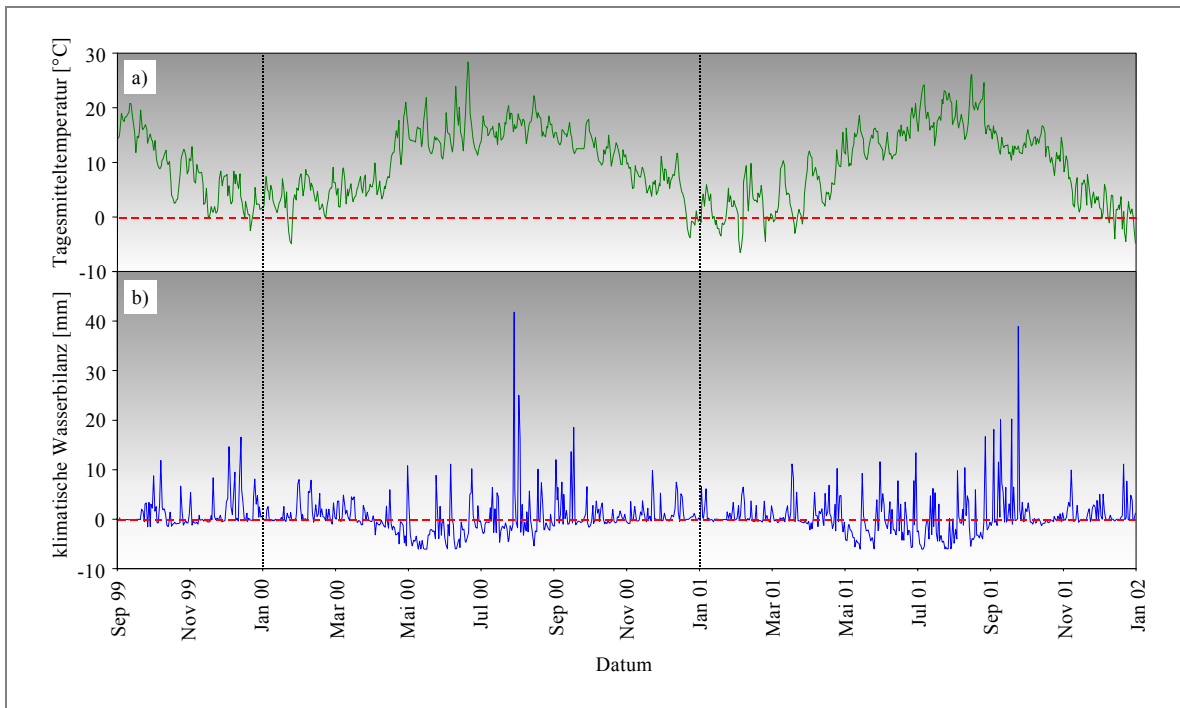
Aus dem Jahresgang der mittleren Lufttemperatur (in 2 m Höhe) lässt sich der Temperaturverlauf übers Jahr gut erkennen. Die Temperaturminima treten meist am Anfang oder zum Ende des Jahres auf und liegen bei  $-5^{\circ}\text{C}$ . Im August werden dann die Temperaturmaxima erreicht, die im Untersuchungszeitraum zwischen  $23^{\circ}\text{C}$  (2000) und  $26^{\circ}\text{C}$  (2002) schwanken (Abb. 4.7, a). Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt bei  $9.1^{\circ}\text{C}$  bis  $9.9^{\circ}\text{C}$  zwischen 2000 und 2002. Im Frühjahr 2001 kommt es kurzzeitig zu mehreren Kälteeinbrüchen bis Ende März, die zu einem verspäteten Vegetationsbeginn führen.



**Abb. 4.7:** Wetterstation Thumby (*preagro* 909): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz

### Kassow

Der Untersuchungsstandort Kassow liegt im Binnenland von Mecklenburg-Vorpommern und wird durch kontinental geprägtes Klima beeinflusst. Die Klimastation (*preagro* 905) ist gut 1200 m vom Schlag *III* entfernt, während die Niederschlagsmessstelle des DWD (Oettelin 24315) deutlich näher (700 m) am Schlag liegt. Da es bei der *preagro*-Station immer wieder Probleme bei der Niederschlagsmessung gibt, ist man auf die Messwerte der Station Oettelin ausgewichen. In den Untersuchungsjahren 2000 und 2001 kommt es in der Vegetationszeit von April bis August zu einem Wasserdefizit in der klimatischen Wasserbilanz von 146 mm bzw. 147 mm. Eine relativ lange Trockenperiode von April bis Ende Juni 2000 mit sehr hohen Temperaturen führt beim Pflanzenbestand zu länger anhaltendem Wasserstress (Abb. 4.8, b). Über den Untersuchungszeitraum (Januar 2000 bis Dezember 2001) weist der Standort einen durchschnittlichen Wasserüberschuss von 117 mm/a aus (Abb. 4.12). Die Tagesmittel der Temperatur liegen 2000 bei 10.4 °C bzw. 2001 bei 9.4 °C. Im August 2000 werden Tageshöchstwerte von 28.4 °C gemessen, 2001 sind es lediglich 26.1 °C. Die minimale Tagestemperatur liegt am 03.02.01 bei -6.5 °C und bis zum 20.04.01 treten immer wieder Frostperioden in dieser Region auf (Abb. 4.8, a). Die klimatischen Bedingungen sind im Gebiet um Kassow mit lokal auftretenden Spätfrösten und relativ niedrigen Niederschlagsmengen zur Vegetationsperiode als ertragslimitierend einzuschätzen.



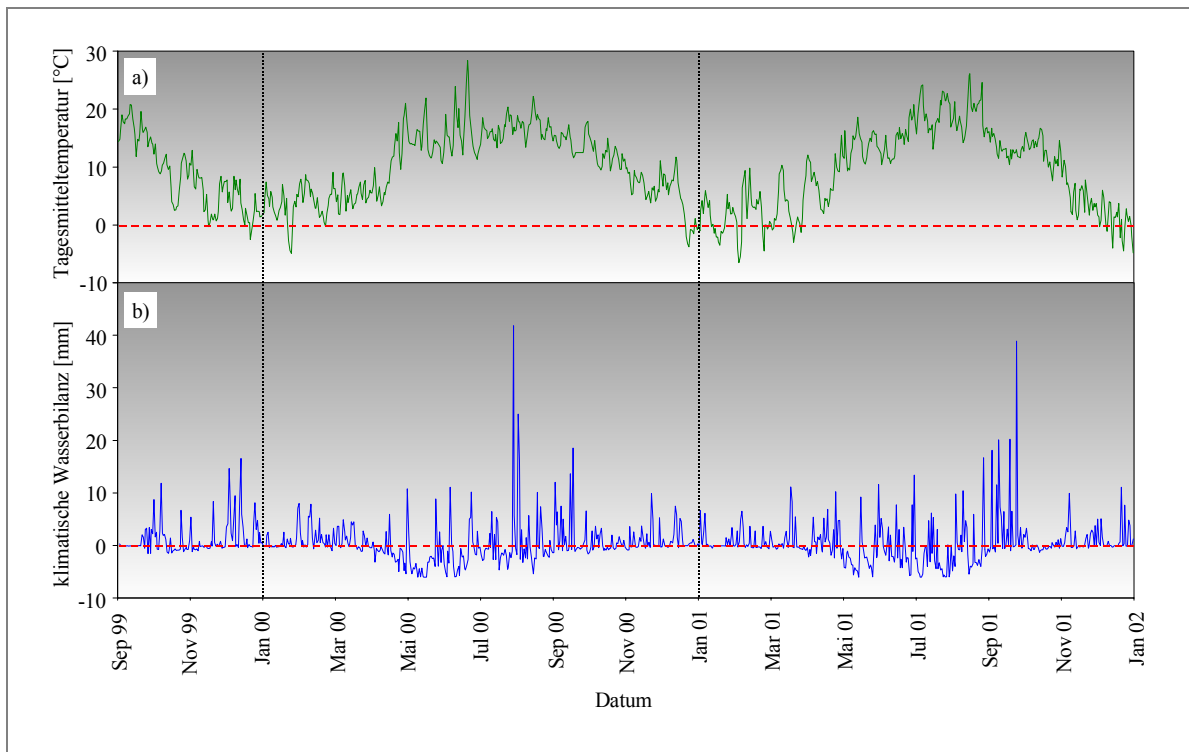
**Abb. 4.8:** Wetterstation Kassow (*preagro* 905): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz (berechnet aus Daten der DWD-Messstelle Oettelin)

### Groß Twülpstedt

Die Klimastation (*preagro* 910) im ostniedersächsischen Volkmarisdorf liegt gut 8000 m vom Untersuchungsschlag *Kamp-Ost* entfernt und wird durch gemäßigt kontinentales Klima beeinflusst, d.h., heiße Sommer und nasskalte Winter charakterisieren dieses Klima. Das zeigen auch die gemessenen maximalen Tageshöchsttemperaturen von bis zu 27.9 °C (20.06.00) und die Tagestiefsttemperaturen von -10.7 °C (10.12.02) in Abb. 4.9 (a). Auch dieser Standort ist anfällig gegenüber Spätfrösten im Frühjahr, wie das Jahr 2001 zeigt. Bis Mitte April muss auch hier mit Frost gerechnet werden. Die Auswertung der Wetterdaten der lokalen Messstation (*preagro* 910) ergibt für das Jahr 2000 nur eine sehr geringe Niederschlagsmenge von 464 mm, für 2001 664 mm und für 2002 sogar 1001 mm. In 2000 liegt



das klimatische Wasserdefizit bei 120 mm. Über die Vegetationsperiode von April bis August 2000 fällt ein Wasserdefizit von 253 mm, 2001 von -210 mm und 2002 ein Wasserüberschuss von 61 mm an. Besonders in den Jahren 2000 und 2001 limitierte Wasserstress in den vegetationsstarken Monaten Mai bis Juni die Bestandesbildung (Abb. 4.9, b). Die positive klimatische Wasserbilanz mit 163 mm/a über die drei Untersuchungsjahre täuscht über den großen Schwankungsbereich auf diesem Standort hinweg, der von -120 mm (1999) bis 470 mm (2002) reicht (Abb. 4.12). Aus klimatischer Sicht ist der Standort als eher ungeeignet für den Ackerbau anzusehen wegen der Frostgefährdung und längerer Perioden mit ausgeprägten Wasserdefiziten, die auf den Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität ertragslimitierend wirken.



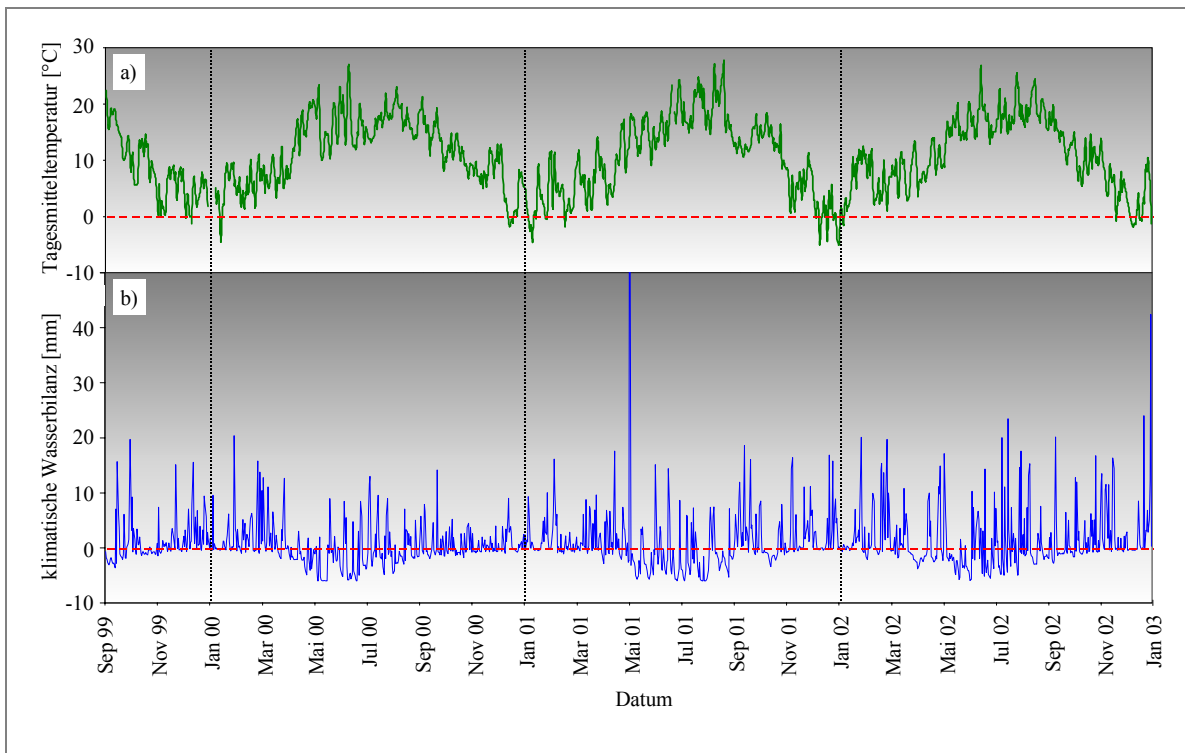
**Abb. 4.9:** Wetterstation Groß Twülpstedt (*preagro* 910): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz

### Beckum

In den Beckumer Bergen am Rand der Münsterländer Bucht in Nordrhein-Westfalen liegt das Untersuchungsgebiet Beckum mit dem Schlag *Autobahn*. Die Messstation (*preagro* 911) ist nur ca. 150 m vom Schlag entfernt. Die Temperaturmittelwerte liegen im Untersuchungszeitraum von 2000 bis 2002 immer über 10.5 °C und damit deutlich über dem mit 9.3 °C angegebenen langjährigen Temperaturmittel für diese Region (siehe Kap. 4.1.3; Tab. 4.2).

Die Winter fielen auf Grund der Lage (Münsterländer Bucht) sehr mild aus und nur selten kommt es zu länger anhaltenden Kälteperioden (Abb. 4.10, a). Das langjährige Niederschlagsmittel von 800 mm wird in 2 von 3 Jahren deutlich übertroffen. Trotzdem kommt es auch hier immer wieder kurzzeitig zu negativen Wasserbilanzen während der Vegetationszeit. Eine sehr ausgeprägte Trockenphase gibt es vom 16.04.00 bis zum 16.05.00 mit einem Wasserdefizit von 165 mm (Abb. 4.10, b). Häufig treten über den Vegetationszeitraum von April bis August Wasserdefizite auf. Eine Ausnahme bildet dabei der sehr feuchte Sommer 2002. Über den Untersuchungszeitraum (2000 bis 2002) weist das Gebiet um Beckum eine durchschnittliche klimatische Wasserbilanz von 300 mm/a auf (Abb. 4.12). Die hohen

Niederschlagsmengen der Wintermonate füllen den Bodenwasserspeicher bis zum Frühjahr wieder auf und so gehört das Münsterländer Tiefland zu den klimatisch bevorzugten landwirtschaftlichen Regionen in Deutschland.



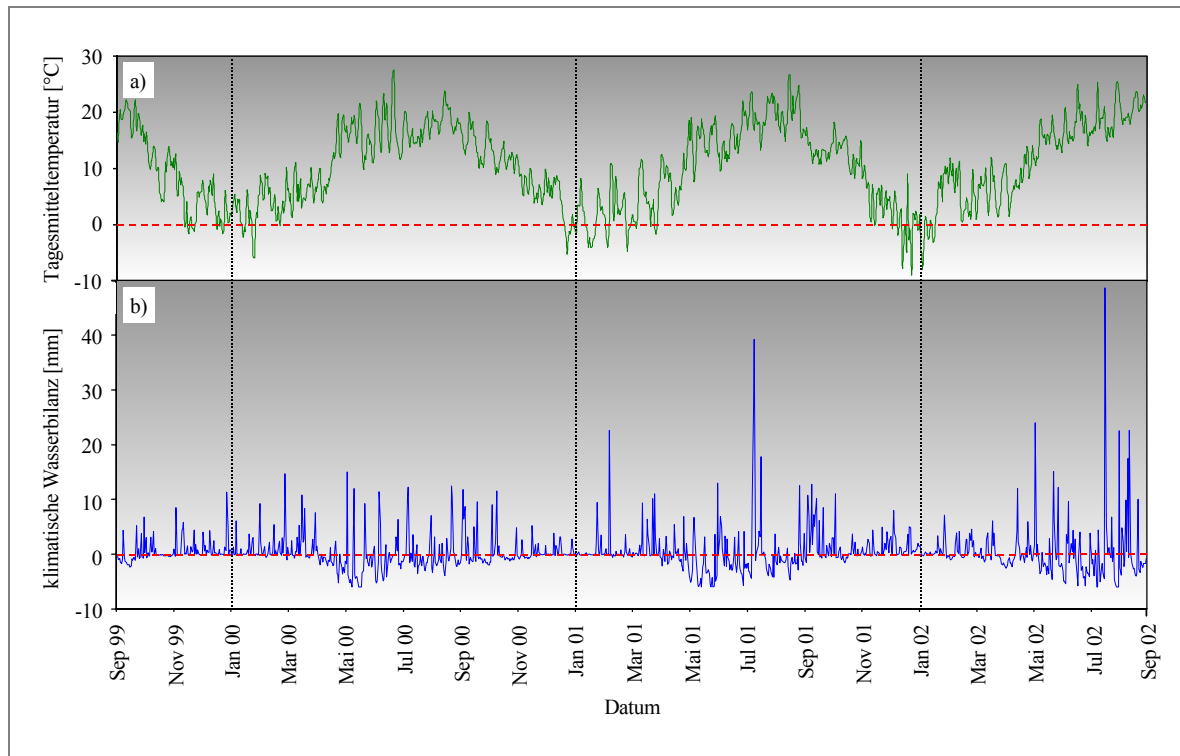
**Abb. 4.10:** Wetterstation Beckum (*preagro* 911): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz

### Wulfen

Wulfen liegt im Regenschatten des Harzes in der Sandlössbörde von Sachsen-Anhalt. Die Wetterstation der Firma WIMEX (*Drosa-Flughafen*) steht auf einer kleinen Anhöhe und ist ca. 5000 m vom Schlag *Finkenherd* entfernt. Die Gegend gehört mit einer jährlichen Niederschlagsmenge von 440 mm zu den Trockengebieten in Deutschland. Kontinentales Klima prägt diese Region mit trockenen heißen Sommern und kalten Wintern. Die Jahresmitteltemperaturen liegen im Untersuchungszeitraum bei 10 °C und darüber. Abb. 4.11 (a) zeigt, dass im Sommer maximale Tagesmitteltemperaturen von 27.5 °C (21.06.00) erreicht werden und im Winter die Werte bis auf -8.9 °C (23.12.01) fallen. Auch auf diesem Standort ist mit einer Frostgefährdung bis in den April hinein zu rechnen, so wie es 2001 der Fall ist.

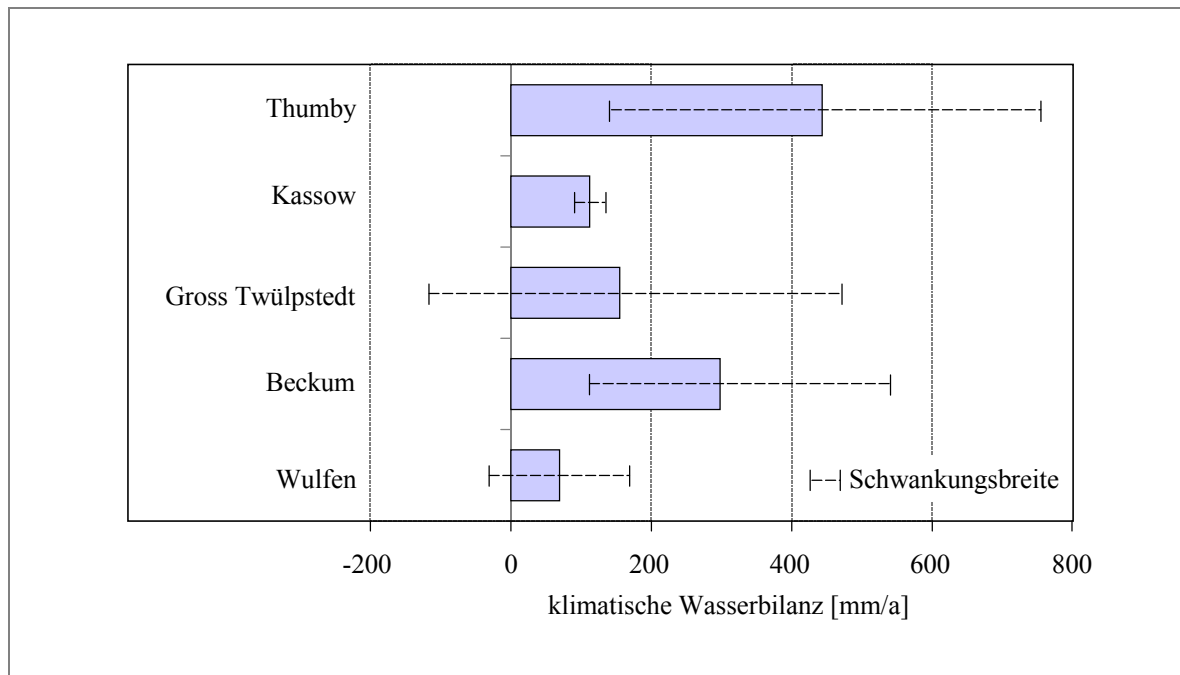
Die klimatische Wasserbilanz zeigt über den Untersuchungszeitraum auf diesem Standort von April bis in den September hinein ein ausgeprägtes Wasserdefizit (Abb. 4.11, b). Besonders von April bis Juni kommt es oft zu längeren Trockenperioden, die den vegetativen Aufwuchs der Bestände durch länger anhaltenden Wasserstress limitieren. In 2000 beträgt das Wasserdefizit über den Zeitraum April bis August 204 mm und im Folgejahr 82 mm.





**Abb. 4.11:** Wetterstation Drosa (*Drosa-Flughafen*): a) Tagesmitteltemperatur und b) klimatische Wasserbilanz

In Abb. 4.12 werden die Wasserbilanzen aller Untersuchungsgebiete von Januar 2000 bis Dezember 2002 (Ausnahme: Kassow bis Dezember 2001 und Wulfen bis August 2002) gegenübergestellt.



**Abb. 4.12:** Grafische Darstellung der durchschnittlichen klimatischen Wasserbilanz und ihrer Schwankungsbreite für die Standorte Thumby, Kassow, Groß Twülpstedt, Beckum und Wulfen über den Untersuchungszeitraum 2000 bis 2002

Die untersuchten Standorte bewegen sich bei der durchschnittlichen Jahreswasserbilanz zwischen 66 mm/a (Wulfen) und 436 mm/a (Thumby). Die Standorte Thumby und Groß Twülpstedt zeigen über den Untersuchungszeitraum 2000 bis 2002 einen Schwankungsbereich von > 580 mm. Für denselben Zeitraum weisen die Standorte Beckum und Wulfen einen Schwankungsbereich von 428 mm bzw. von nur 226 mm auf. Der fünfte Standort Kassow zeigt einen sehr engen Schwankungsbereich, der zu einem großen Teil auf die Auswertung von nur 2 Jahren (2000 und 2001) zurückzuführen ist.

Mit jährlichen klimatischen Wasserbilanzen von < 200 mm sind die Standorte Groß Twülpstedt und Wulfen aber auch Kassow bei länger auftretenden Trockenperioden im Sommer nicht in der Lage auf den trockenen Sandstandorten, die Pflanzenbestände mit genügend Wasser zu versorgen. In relativ trocknen Jahren (Niederschlagsmenge < 80 % des langjährigen Mittels) kann der Bodenwasserspeicher im Frühjahr nur teilweise aufgefüllt werden, so dass auch hier mit längerfristigen Wasserdefiziten während der Vegetationsperiode zu rechnen ist, die ertragslimitierend wirken. Dies beweisen die negativen Jahreswasserbilanzen der Standorte Groß Twülpstedt und Wulfen in 2000. Die Standorte Beckum und Thumby zeigen hingegen jährliche Wasserüberschüsse von 400 mm und mehr. Hier wird der Bodenwasserspeicher über die Winterperiode komplett aufgefüllt und die Pflanzen können über die Vegetationszeit auf die nutzbare Feldkapazität zurückgreifen.

#### 4.1.4 Nutzung

Die fünf für diese Arbeit beprobten Schläge unterliegen alle der Ackernutzung. Tab. 4.3 ist die Fruchtfolge für die einzelnen Schläge während des Untersuchungszeitraums zu entnehmen.

**Tab. 4.3:** Fruchtfolgen der Untersuchungsschläge

Standort	Schlagbezeichnung	Fruchtfolge			
		1999	2000	2001	2002
Thumby	<i>Feldscheide-links</i>	-	WW	WG	WRa
Kassow	<i>III-3</i>	WRa	WW	WW	-
Groß Twülpstedt	<i>Kamp-Ost</i>	WW	WW	WG	ZR
Beckum	<i>Autobahn</i>	WRa	WW	WW	TR
Wulfen	<i>Finkenherd</i>	-	WW	WRa	WW

Bemerkung: WW – Winterweizen, WG – Wintergerste, WRa – Winterraps, ZR – Zuckerrüben, TR – Triticale

Typisch für die hier vorgestellten Marktfruchtbetriebe ist der hohe Getreideanteil in der Fruchtfolge. Auf keinem der Schläge erfolgte während des Untersuchungszeitraumes der Anbau von Zwischenfrüchten.

Beispielhaft für Schlag *Autobahn* sind die Bewirtschaftungsmaßnahmen Bodenbearbeitung, Aussaat, Stickstoffdüngung und Ernte in Tab. 4.4 dargestellt. Erwähnenswert ist, dass auf Schlag *Autobahn* nach der Ernte in 2000 und 2001 Hühnermist ausgebracht wurde. Auf Schlag *III-3* wurde in 2000 sogar Klärschlamm ungleichmäßig auf der Fläche verteilt. Die wesentlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen für die Schläge *Feldscheide-links*, *Kamp-Ost*, *III-3* und *Finkenherd* sind im Anhang (Tab. 9.1 - 9.4) zu finden.

**Tab. 4.4:** Übersicht über Managementmaßnahmen auf Schlag *Autobahn* während des Untersuchungszeitraums von 1999 bis 2002 (ohne Pflanzenschutz)

Datum	Maßnahme (Düngemittel)	Menge/Tiefe
20.08.99	Ernte Winterraps	4.0 t TM/ha
17.09.99	Bodenbearbeitung	8 cm
19.09.99	Aussaat Winterweizen <i>Batis</i>	
22.03.00	1. N-Düngung: variabel (AHL)	30 - 55 kg N/ha
14.04.00	2. N-Düngung: variabel (AHL)	50 - 60 kg N/ha
16.05.00	3a. N-Düngung: variabel (AHL)	35-60 kg N/ha
27.05.00	3b. N-Düngung: einheitlich (AHL)	40 kg N/ha
09.08.00	Ernte Winterweizen	7.0 t TM/ha
23.08.00	Ausbringung von Hühnermist	ca. 57 kg N/ha
23.08.00	Bodenbearbeitung	16 cm
24.08.00	Aussaat Winterweizen <i>Batis</i>	
20.03.01	1. N-Düngung: variabel (AHL)	60 - 70 kg N/ha
24.04.01	2. N-Düngung: variabel (AHL)	40 - 70 kg N/ha
19.05.01	3. N-Düngung: variabel (AHL)	60 - 80 kg N/ha
23.07.01	Ernte Winterweizen	6.9 t TM/ha
13.08.01	Ausbringung von Hühnermist	ca. 171 kg N/ha
14.08.01	Bodenbearbeitung	16 cm
29.09./10.10.01	Aussaat Triticale <i>Lamberto</i>	
11.03.02	1. N-Düngung: einheitlich (AHL)	65 kg N/ha
28.03.02	Herbizideinsatz mit N-Ausbringung (AHL)	10 kg N/ha
14.04.02	2. N-Düngung: variabel (AHL)	50 - 85 kg N/ha
28.07.02	Ernte Triticale	7.2 t TM/ha

Bemerkung: AHL – Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung

## 4.2 Bodenuntersuchungen

Die räumliche Variabilität für ein zu beprobendes Gebiet hat einen großen Einfluss auf das Probenahmemuster. Von Bedeutung sind hier hauptsächlich die Probenanzahl sowie die räumliche Verteilung der Proben. Für das zu beprobende Gebiet sollte das Probenahmemuster einen repräsentativen Ausschnitt aus dem Gesamtgebiet abbilden, d.h. der Mittelwert der Stichprobe soll eine gute Schätzung für den Mittelwert der Gesamtpopulation bzw. der Teilfläche abgeben. Daraus folgt, dass für homogene Flächenareale größere Abstände zwischen den einzelnen Probenahmepunkten in Frage kommen, während für heterogene Verhältnisse eher kleinere Probenahmeabstände bevorzugt werden.

Die optimale Stichprobengröße hängt aber nicht nur von der Variabilität der zu beprobenden Eigenschaft, sondern auch von den Ansprüchen an die Genauigkeit zur Schätzung des Mittelwertes der Population und dem Konfidenzintervall für die Schätzung des Mittelwertes der Population ab. Bei annähernd normalverteilten und unkorrelierten Daten lässt sich der Stichprobenumfang (n) nach folgender Formel abschätzen (BURROUGH & WEBSTER, 1991):

$$n = (t^2 \cdot s^2) / d^2 \quad (4.1)$$

wobei t der Tabellenwert für die Student's t-Verteilung mit einem zweiseitigen Konfidenzintervall und einer gegebenen Eintrittswahrscheinlichkeit ist, s die Schätzung der Standardabweichung der Population und d die Abweichung des Stichprobenmittelwertes vom Gesamtmittelwert. Theoretisch bedeutet dies, dass bei unbekanntem Stichprobenumfang die Anzahl an Freiheitsgraden für die Bestimmung von t nicht möglich ist. In der Praxis wird davon ausgegangen, dass die Anzahl n groß genug ist, so dass die Freiheitsgrade gleich der

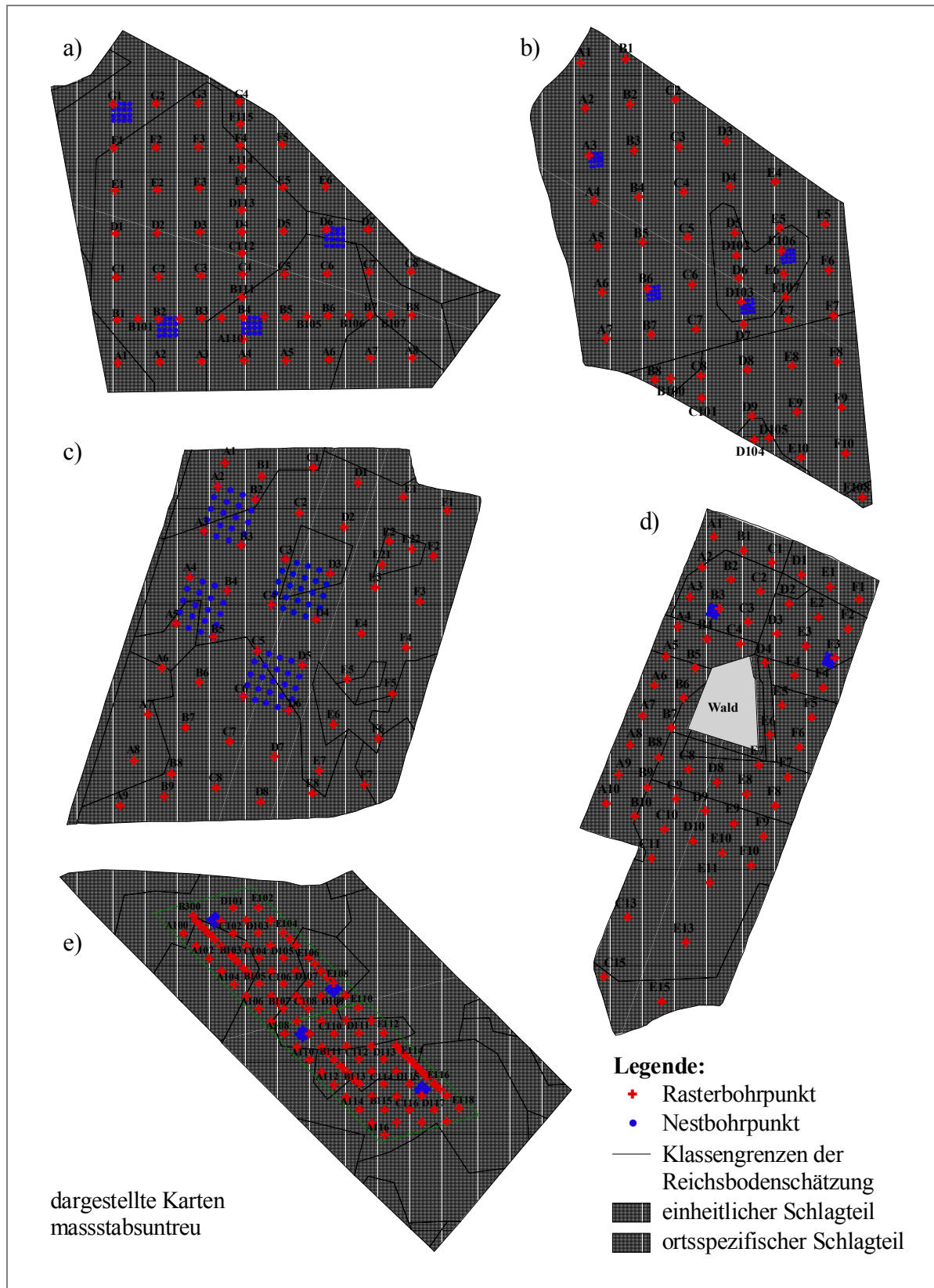
von großen Stichproben sind. Für ein Konfidenzintervall mit einer Schätzgenauigkeit des Mittelwertes von 95 % würde bei einem zweiseitigen Test der t-Wert  $\pm 1.96$  betragen bei einer unendlich großen Stichprobe (LOZÁN & KAUSCH, 1998). Die notwendige Anzahl an Proben ergäbe sich dann aus  $(1.96)^2 \cdot s^2 / d^2$ .

In der hier vorliegenden Arbeit wird der Stichprobenumfang durch die Kosten für Probenahme und Analytik bzw. durch die vorhandene Laborkapazität bestimmt.

#### **4.2.1 Beprobungsstrategie und -raster der Untersuchungsschläge**

Als Beprobungsstrategie wird eine geostatistische Rasterbeprobung gewählt, da sich die Methode gut hinsichtlich einer späteren Interpolation zur Erstellung von räumlichen Eigenschaften eignet (HERBST, 2002). Bei der Rasterbeprobung auf den Untersuchungsschlägen erfolgte die Aufteilung in gleichmäßige quadratische Rasterzellen an deren Schnittpunkten die Bohrpunkte festgelegt werden. Die Rasterzellen werden stellenweise entlang von Transekten durch Zwischenpunkte oder Nester weiter verengt. Ziel dieser zusätzlichen Abstandverringering ist eine verbesserte Anpassung des Semivariogramms bei kleinen Lag-Distanzen (HERBST, 2002; siehe Kap. 4.4.1). Dies muss aber nicht zwingend der Fall sein (WENDROTH et al., 2001).

Als Vorinformation für die Erstellung des Probenahmerasters konnte nur auf das Kartenmaterial der Reichsbodenschätzung zurückgegriffen werden. Die Informationen wurden durch eine Feldbegehung komplettiert. So gingen auch das Relief und die Arbeitsbreite mit in die Planung ein. Auf als repräsentativ angesehen Teilflächen der Untersuchungsschläge wurde die Beprobung intensiviert und Nester angelegt (Abb. 4.13). Dabei wurde darauf geachtet, dass sog. korrespondierende Nesterpaare entstehen, die zwar in derselben Bodeneinheit (nach KA4) liegen aber unterschiedlich bewirtschaftet werden.



**Abb. 4.13:** Beprobungsraster der Untersuchungsschläge mit Schlagteilung und Klassengrenzen der Reichsbodenschätzung: a) *Kamp-Ost*, b) *Feldscheide-links*, c) *Finkenherd*, d) *Autobahn* und e) *111-3*

**Thumby**

Das Probenahmedesign auf Schlag *Feldscheide-links* (Abb. 4.13, b) wird wegen der homogenen Bodenverteilung großmaschig angelegt. Der Basisabstand beträgt ein vielfaches der Fahrspurbreite (18 m), um unnötige Flurschäden im Bestand zu vermeiden. Die Beprobung findet aber nicht in der Fahrspur sondern 3 - 5 m davon entfernt statt. Insgesamt werden 51 Rasterpunkte auf dem Untersuchungsschlag angelegt, wovon 43 auf das reguläre 72 x 72 m Raster entfallen und 8 auf sog. Zwischenpunkte mit geringerem Basisabstand. Dadurch wird eine Probenahmedichte von  $< 0.5$  ha erreicht. Zusätzlich zum Standardraster werden vier Nester mit je 16 Bohrpunkten angelegt, um die kleinräumige Variabilität auf dem Schlag zu erfassen. In den Nestern wird mit Bohrlochabständen von 6 x 6 m gearbeitet.

**Kassow**

Der kleinräumige Wechsel der Bodenart führte auf Teilschlag *III-3* zu einer sehr engmaschigen Beprobung des 12.0 ha Areals (Abb. 4.13, e). Da man sich auch hier an der Fahrgassenbreite (17 -18 m) orientiert, wird mit einer Rastergröße von 34 x 34 m gearbeitet. An bestimmten Stellen sind die Probenahmeabstände sogar auf 8.5 m verkürzt worden. Insgesamt werden 117 Bohrpunkte angelegt, wovon 86 auf das Standardraster und 31 auf Zwischenpunkte entfallen. Wie schon in Thumby beschrieben, werden auch auf dieser Fläche korrespondierende Nester (mit 16 Bohrungen und einem Basisabstand von 6 x 6 m) angelegt, um die kleinräumliche Variabilität zu erfassen.

**Groß Twülpstedt**

Die Beprobung auf Schlag *Kamp-Ost* erfolgt in einem 48 x 48 m Raster unter Berücksichtigung der 24 m Fahrgassen (Abb. 4.13, a). Zu den regulären 46 Rasterpunkten kommen nochmals 14 Punkte, die als Transekt in das Standardraster eingehängt werden und es stellenweise auf 24 m verengen. Die Beprobungsdichte liegt hier bei 0.2 ha. Neben den 59 Rasterpunkten werden auch wieder vier Nester mit jeweils 16 Bohrungen angelegt und ebenfalls ins Standardraster integriert. Der Basisabstand bei den Nestern liegt bei 6 x 6 m.

**Beckum**

Auf Schlag *Autobahn* werden 60 Rasterpunkte festgelegt. Der Basisabstand beträgt 50 x 50 m und wird im südlichen Teil der Fläche sogar auf 100 x 100 m ausgedehnt, weil die Karte der Reichsbodenschätzung ein sehr homogenes Areal anzeigt (Abb. 4.13, d). Mit dem verwendeten Standardraster wird eine Beprobungsdichte von 0.3 ha erreicht. Durch die Waldfläche in der Mitte der Schläges werden die Transekte C und D unterbrochen und die Bohrung *C4* um 10 m versetzt. Zur Erfassung der kleinräumigen Variabilität werden auch hier zwei Nester angelegt, die miteinander korrespondieren. Jedes Nest besteht aus 16 Bohrpunkten mit einem Basisabstand von 5 x 5 m.

### Wulfen

Der Schlag *Finkenherd* ist mit 45.6 ha der größte der fünf Untersuchungsschläge. Laut Karte der Reichsbodenschätzung weist der Schlag großräumig homogene Flächenareale aus. Aus diesem Grund wird hier mit einer sehr großräumigen Rasterauflösung von 96 x 96 m gearbeitet (Abb. 4.13, c). Das Standardraster besteht aus 51 Bohrpunkten. Weitere 90 Nesterpunkte, die in das Raster eingehängt werden, verengen es bis auf 28 x 24 m bzw. 24 x 24 m. Die Probenahmedichte liegt hier bei 0.3 ha.

In Tab. 4.5 sind alle fünf Untersuchungsschläge mit der Anzahl der Rasterbohrpunkte, der Nester sowie deren Basisabständen und dem Termin der Erstbeprobung aufgeführt.

**Tab. 4.5:** Probenahmeraster der Untersuchungsschläge

<b>Standort</b> Schlagname Schlagkürzel	<b>Thumby</b> <i>Felds.-links</i> (Thy)	<b>Kassow</b> <i>III-3</i> (Ksg)	<b>Twülpstedt</b> <i>Kamp-Ost</i> (Gtw)	<b>Beckum</b> <i>Autobahn</i> (Bec)	<b>Wulfen</b> <i>Finkenherd</i> (Wul)
Erstbeprobung	23.08.00	28.10.99	11.11.99	15.09.99	23.08.00
<b>Standardraster:</b>					
Anzahl der Probenahmepunkte	50	116	59	60	51
Basisabstand [m]	72 x 72	34 x 34	48 x 48	50 x 50	96 x 96
Beprobungsdichte [n/ha]	2.2	9.7	4.9	3.0	1.1
Begründung für die gewählte Rasterweite	homogene Bodenverhältnisse	kleinräumige Wechsel der Bodenart	kleinräumige Wechsel der Bodenart	südlicher Schlagteil homogen	großräumig homogene Bodenareale
<b>Nester:</b>	4	4	4	2	4
Anzahl der Nesterpunkte	64	64	64	32	90
Basisabstand [m]	6 x 6	6 x 6	6 x 6	5 x 5	28/ 24 x 24

### 4.2.2 Probenahme auf den Untersuchungsschlägen

Bei der Probenahme wird zwischen der Standardbeprobung und der Tiefenbeprobung unterschieden. Bei der Standardbeprobung werden zu mehreren Terminen flächendeckend Bodenproben aus 0 - 9 dm Tiefe entnommen. Auf den Schlägen *Autobahn* und *Feldscheide-links* erfolgt eine Tiefenbeprobung bis 30 dm an den Nesterpunkten. Die Tiefenbeprobung auf Schlag *Feldscheide-links* wird mit der Erstbeprobung am 23.08.00 und am 06.08.02 nach der Ernte durchgeführt. Auf Schlag *Autobahn* erfolgen die Tiefenbeprobungen zu drei Terminen (15.09.99, 23.10.01 und 01.08.02) an zwei Nestern.

An allen Probenahmepunkten werden neben den zeitlich sehr dynamischen Zustandsgrößen Mineralstickstoff- und Wassergehalt auch die zeitlich stabilen Bodenkenngrößen Textur und  $C_{org}$ -Gehalt bestimmt. Die  $N_{min}$ -Beprobung erfolgt jährlich vor der ersten Stickstoffgabe im Frühjahr und nach der Ernte im Herbst an denselben Probenahmepunkten mit Hilfe eines DGPS-Empfängers. In einem Radius von 2 m um den Beprobungspunkt werden nach dem Zufallsprinzip fünf Einstiche mit dem Bohrstock bis 9 dm Tiefe vorgenommen. Die Bohrkerns werden in drei Bodenabschnitte (0 - 3 dm, 3 - 6 dm, 6 - 9 dm) separiert und die fünf Einzelproben der jeweiligen Tiefen gut durchmischt. Auf dem Feld werden die Mischproben

in Kühlboxen gelagert und anschließend tiefgefroren. Bis zur Aufbereitung im Labor erfolgt die Lagerung bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Die Separierung der Tiefenprofile bis 30 dm Tiefe erfolgt in den obersten 9 dm wie bei der Standardbeprobung in 3 dm Kompartimenten und ab 15 dm in jeweils 5 dm mächtigen Schichten. Der Bereich aus 9 - 15 dm Tiefe wird zu einer Schicht zusammengefasst.

Mit der Erstabprobung erfolgt auch eine visuelle Ansprache der ausgewiesenen Tiefenkompartimente, hinsichtlich der Bodenfarbe, des Bodengefüges, der Lagerungsdichte, der Stau-nässe und des Steingehaltes. Neben dem Grundwasserflurabstand, der oft nur abgeschätzt wird, werden auch die Reliefposition und Besonderheiten (z.B. Strohauflagen, Lagergetreide) mit notiert. Bei jeder Probenahme wird neben dem mineralischen Stickstoff auch der Wassergehalt des Bodens mitbestimmt. Im Labor werden dann folgende Analysen durchgeführt:

#### **$N_{\min}$ -Bestimmung**

Nach dem schonenden Auftauen der Bodenproben bei  $5 - 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  erfolgt die Bodenextraktion mit KCl-Lösung. Die Suspension wird eine Stunde geschüttelt und der Extrakt des Filtrats dann photometrisch bei 540 nm auf  $\text{NO}_3\text{-N}$  und bei 660 nm auf  $\text{NH}_4\text{-N}$  untersucht (ISO 14256). Alle  $N_{\min}$ -Konzentrationen werden unter der Annahme einer einheitlichen Lagerungsdichte von  $1.5\text{ g/cm}^3$  auf Mengenangaben [ $\text{kg N/ha}$ ] umgerechnet.

#### **Bodenwasser**

Die Bestimmung des Wassergehaltes erfolgt durch Trocknung der Böden bei  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis zur Massenkonstanz (ISO 11461). Die Wassergehalte werden für alle Proben unter Annahme einer konstanten Trockenrohdichte ( $\rho_t = 1.5\text{ g/cm}^3$ ) in Volumen-% [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ] umgerechnet.

#### **Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs ( $C_t$ ) und des Gesamtstickstoffs ( $N_t$ )**

Die Bestimmung des  $N_t$ - und  $C_t$ -Gehaltes erfolgt ebenfalls photometrisch durch trockene Verbrennung im LECO 2000 Analysator unter Zuhilfenahme von Katalysatoren (MERIAM et al., 1996) nach ISO 13878 bei  $N_t$  und nach ISO 10694 bei  $C_t$ .

#### **Texturanalyse**

Bei der Texturbestimmung kommen zwei Analyseverfahren zum Einsatz. Zum einen wird die Textur nach KÖHN (DIN 19683) mit drei Wiederholungen durchgeführt und zum zweiten wird mit dem Laserdiffraktometer (Firma: SYMPATEC) und zwei Wiederholungen gearbeitet. Die Korngrößenermittlung erfolgt in beiden Fällen über Sedimentation. Bei der Laserdiffraktion wird die Partikelgrößenverteilung durch Analyse von Laserbeugungsspektren ermittelt. Allen Proben wird als Dispergierungsmittel Tetranatriumpyrophosphat zugesetzt, um die organische Substanz zu zerstören.

#### **Phosphor- (P), Kalium- (K) und Magnesium- (Mg) Analyse**

Für die P-, K- und Mg-Analyse werden die Proben luftgetrocknet und auf 2 mm abgesiebt. Bei der Mg-Bestimmung wird der Probe  $\text{CaCl}_2$ -Lösung zugesetzt, für die P- und K-Analyse wird Kalziumlactat benutzt. Die Messung von K und Mg erfolgt mit dem Atomabsorptionsphotometer (AAS) Solar von Unicam. Die P-Analyse wird mit dem Photometer EPOS 5060 von Eppendorf durchgeführt. Mg wird bei einer Messwellenlänge von 285.2 nm, K bei 766.5 nm und P bei 819.0 nm ermittelt (VDLUFA, 1997).



### 4.3 Datenaufbereitung

Um die verschiedenen erhobenen Daten miteinander vergleichbar zu machen, ist es notwendig die gesammelten Daten zu geocodieren. Diesen Zweck erfüllen heute Geoinformationssysteme (GIS). Unter GIS-Systemen versteht man computergestützte Systeme zur Erfassung, Erstellung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung von geographischen Daten. Eine wichtige Rolle spielen diese Systeme zum einen beim Erfassen von DGPS-gestützten Felddaten (wie z.B. Ertragsdaten, Schlaggrenzen, Probennahmepunkten) und zum anderen um Applikationskarten für unterschiedliche Anwendungen (wie Aussaat, Düngung) zu generieren. Die GIS-gestützte Datenmodellierung von Informationen aus verschiedenen Teilbereichen (z.B. Bodenschätzung, Ertragskarte) können als Entscheidungshilfen für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung dienen.

Bei der Datenhaltung unterscheidet man zwischen Vektor- und Rasterdaten. Vektordaten sind in einem GIS-System geocodierte Punkte, Linien oder Polygone, die mit den dazugehörigen Attributdaten in einem Datenbanksystem gespeichert werden. Rasterdaten entstehen, wenn der darzustellende Raum in gleich große, geocodierte (Raster-)Zellen zerteilt wird, die durch einen numerischen Wert inhaltlich beschrieben werden.

Im Projekt *preagro* wird das GIS-System ArcView (Firma ESRI) als einheitlicher Datenaustauscher zwischen den einzelnen Teilprojekten verwendet. Mit Hilfe dieses Programms können Vektordaten interpoliert oder gerastert werden. Bei der Erstellung der Variogramme wird auf das Programm GSplus zurückgegriffen.

Das Simulationsmodell benötigt für Vergleichs- und Szenariorechnungen ergänzende Informationen zum Boden, zum Relief, zur N-Düngung und zum Ertrag, die aus weiteren Datenquellen bezogen werden müssen. In den folgenden Unterkapiteln werden diese Datenquellen kurz beschrieben.

#### 4.3.1 Karte der Reichsbodenschätzung (RBS)

In Deutschland basiert die steuerliche Bewertung der Ertragsfähigkeit von landwirtschaftlich genutzten Böden auf der Bodenschätzung, die flächendeckend seit Beginn der 30er Jahre des letzten Jahrhunderts nach gesetzlich vorgeschriebenen Rahmenbedingungen durchgeführt wird.

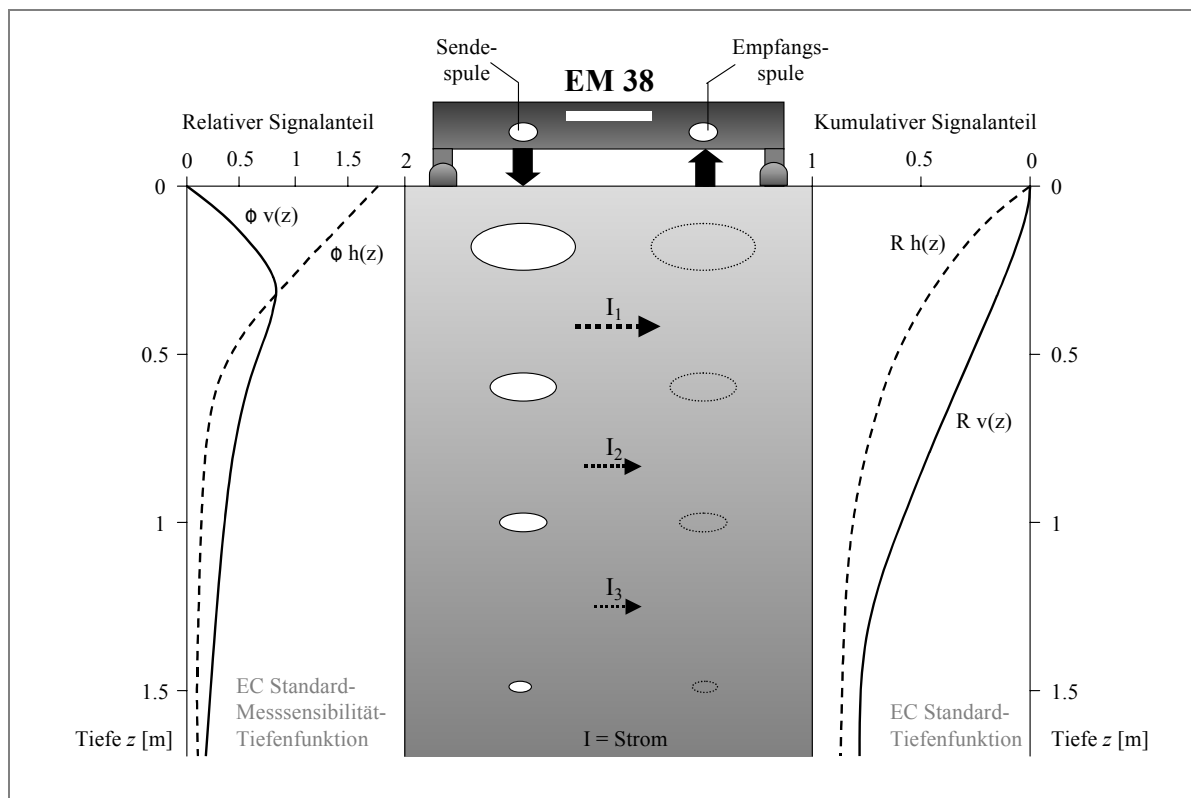
Die Erfassung der Flächen erfolgt in zwei Schritten. Zum einen werden Grablöcher (*Musterstücke*) für die Profilaufnahmen an typischen Stellen angelegt, um den Reinertragswert für die auskartierte Bodenfläche genauer zu erfassen. Die durchschnittliche Erfassungstiefe liegt bei ca.  $\leq 8$  dm (HERBST, 2002). Bei der Aufnahme am Profil werden neben dem Bodengefüge und den Wasserverhältnissen auch standörtliche Besonderheiten (z.B. Ortstein) mit erfasst. Die Klassenbezeichnung erfolgt nach Schätzungsrahmen separat für Acker und Grünland. In einem zweiten Schritt wird dann eine Rasterbeprobung (ca. 50 m) je nach zu erwartender Variabilität mit dem Bohrstock auf den Feldern vorgenommen um die Klassenflächen zu den Grablöchern auszugrenzen (ROTHKEGEL, 1952). Als kleinste ausweisbare Einheit werden 3 ar (300 m<sup>2</sup>) angenommen.

Da sich die Bestimmung der Bodenarten bei der RBS nur aus einem Gemenge von Sand und Ton (abschlammbare Teilchen  $< 10 \mu\text{m}$ ) zusammensetzt, muss die Nomenklatur an die heutige Kartieranleitung (AG BODEN, 1994), die auch Schluff für die Bestimmung der Bodenart mit heranzieht, angepasst werden. Für die Übersetzung der Nomenklatur wird das Programm BOSSA\_SH von REICHE (1998) verwendet.

### 4.3.2 Karte der elektrischen Leitfähigkeit (EC)

Die geophysikalische Bodenkartierung erfolgt auf allen Untersuchungsschlägen mit einem EM38 der Firma GEONICS Ltd. (Kanada), das berührungsfrei die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens nach dem elektromagnetischem Prinzip misst. Beim EM38 handelt es sich um ein Zweispulenverfahren (Abb. 4.14), das in einem horizontalen und einem vertikalen Modus arbeitet. Aus dem Verhältnis der beiden Felder lässt sich der mittlere EC-Wert über ca. 15 dm bestimmen. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch die Textur (Korngrößenverteilung), die Bodenfeuchte, die Zusammensetzung des Bodenfluids, die Verdichtung und die Bodentemperatur bestimmt (DURLESSER, 1999; LÜCK, 2002).

Das EM38 erfasst integral ein Raumvolumen und ordnet diesem eine Leitfähigkeit zu. Unberücksichtigt bleibt dabei aber, ob es sich um einen homogenen Boden ohne Schichtung handelt, oder ob eine vertikale Bodengliederung vorhanden ist. Denkbar wäre auch, dass Bodenstrukturen mit entgegengesetztem Widerstands-Tiefenverhalten aber gleichen Leitfähigkeitswerten durch das EM38 nicht erfasst werden (LÜCK et al., 2002). Ein wesentlicher Nachteil ist, dass das EM38 vor der Messung geeicht und dadurch dem jeweiligen Standort angepasst wird. Damit stellen die Messwerte immer Relativwerte zur Eichung dar und keine Absolutwerte. Sehr empfindlich reagiert das EM38 auf metallische Gegenstände im Boden und Temperaturänderungen. Gerade die Temperaturänderungen erfordern eine fortlaufende Kalibrierung des EM38.



**Abb. 4.14:** Schematische Darstellung der Eindringtiefe des EC-Signals im vertikalen (v) und horizontalen (h) Messmodus (HERBST, 2002)

Leitfähigkeitsmessungen stellen heute eine wertvolle Ergänzung zur Charakterisierung von Bodenvariabilitäten dar (LÜCK & EISENREICH, 2001). In der Praxis wird die elektrische Leitfähigkeit oft für die Kartierung von Substratgrenzen herangezogen oder dient als Entscheidungshilfe beim Anlegen der Bohrpunkte für die Bodenkartierung (Kap. 4.3.3).

### 4.3.3 Digitale Hofbodenkarte (HBK)

Für die Erstellung der Hofbodenkarten werden digital vorhandene Vorinformationen (wie Topografie, Luftbilder, Ertragskarten, Reichsbodenschätzung) genutzt, um die Auswahl der Beprobungspunkte zu optimieren (HERBST, 2002). Bei einer ersten Überfahrt werden Leitfähigkeitsmessungen zur Abschätzung der Bodentextur vorgenommen, die dann in einem zweiten Schritt mit den Vorinformationen verschnitten werden, um die endgültige Lage der Bohrpunkte festzulegen. Die Beprobung erfolgt in der Regel bis 15 dm Bodentiefe nach Kartieranleitung (AG BODEN, 1994). Die Beprobungsdichte ist in der Regel aber geringer als bei Rasterbeprobungen.

### 4.3.4 Digitales Geländemodell (DGM)

Die von SCHMIDT (2001) zur Verfügung gestellten digitalen Geländemodelle bauen auf der Mittelung der Höhe durch Mehrfachüberfahrten (in den Fahrgassen) mit einem 8-Kanal-DGPS-Empfänger (Trimble ACE 2) auf. Die aus neun Überfahrten mit einer Einzelgenauigkeit von  $\pm 1.5$  m erstellten DGM erreichen durch gezielte Filterung und Mittelwertbildung auf 60 % der Fläche eine Genauigkeit von  $\pm 0.5$  m (STREIT, 1981). Aus den digitalen Geländemodellen werden die Grundwasserstände für die Modellrechnung abgeleitet.

### 4.3.5 N-Düngung

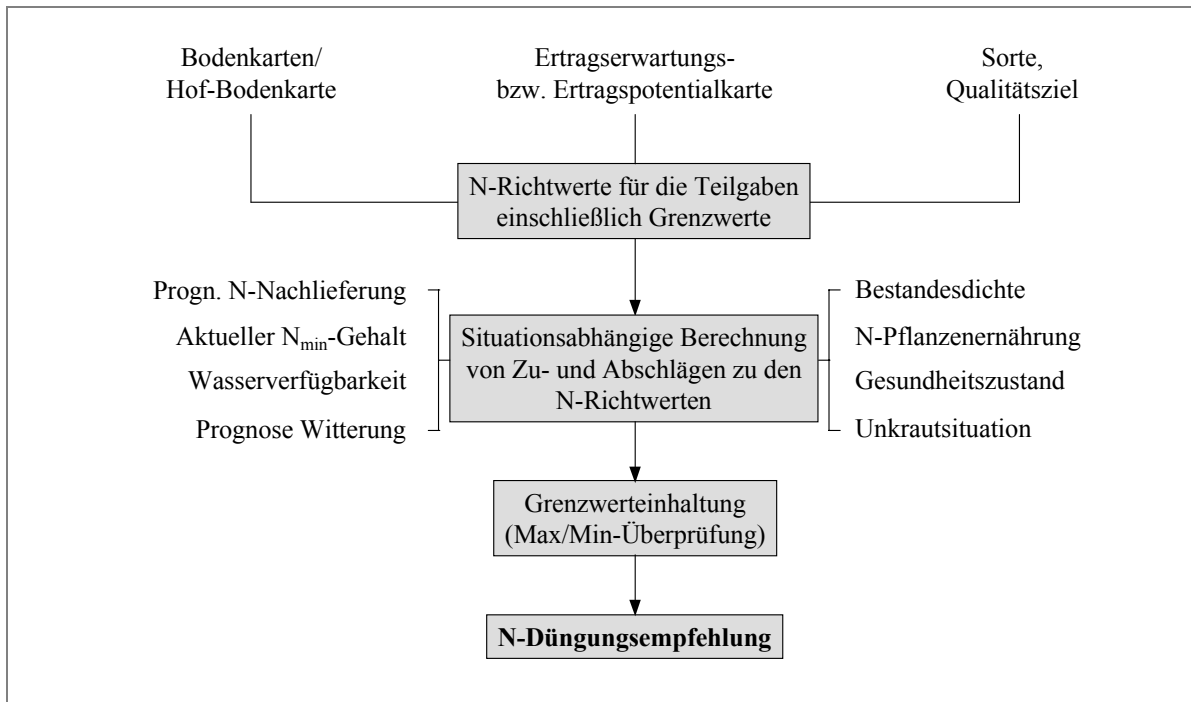
In dieser Arbeit werden zwei Programme zur Düngerbedarfsermittlung benutzt, die im folgenden kurz beschrieben werden.

#### 1. Berechnung der N-Düngungsempfehlung nach *preagro-N* Modul

Die ortsspezifische N-Düngung erfolgt auf den Schlägen im Untersuchungszeitraum 2000 bis 2002 auf der Basis des *preagro-N* Moduls von WENKEL et al. (2002). Aufbauend auf dem methodischen Ansatz der N-Düngeempfehlungen der LUFA Rostock (SCHWEDER et al., 1998) wird ein N-Bilanzmodell für Wintergetreide erstellt. Die Berechnung der optimalen N-Düngung erfolgt nach WENKEL et al. (2002) anhand:

- von Vorinformationen zum Schlag (Vorfrucht, organische Düngung, Relief, Bodenart),
- der angebauten Sorte und des angestrebten Qualitätszieles,
- der teilflächenspezifischen Daten zur aktuellen Boden- und Bestandessituation und
- der bereits applizierten N-Menge.

Wie Abb. 4.15 zu entnehmen ist, wird die Differenzierung der N-Düngung aus der räumlichen Verteilung der Bodeneigenschaften und der Ertragserwartung, die von der Sortenwahl und dem Qualitätsziel abhängt, abgeleitet und im Verlauf der Vegetationsperiode durch die aktuelle Bestandesentwicklung modifiziert. Die Richtwerte für die einzelnen N-Gaben sind standortabhängig und beziehen sich auf die normale Entwicklung des Bestandes. Durch Zu- und Abschläge können bei den einzelnen N-Teilgaben aktuelle Bestandesinformationen (z.B. zur Bestandesdichte) bei der Berechnung berücksichtigt werden. Bevor die Düngungsempfehlung ausgegeben wird, erfolgt nach jeder N-Berechnung eine Minimum-Maximum-Überprüfung auf Einhaltung der gesetzten Grenzwerte. Anschließend wird die N-Düngungsempfehlung in eine gerasterte Applikationskarte umgewandelt.



**Abb. 4.15:** Grobschema zur N-Düngungsempfehlung mit dem Modul *preagro-N* (WENKEL et al., 2002)

Auf vier der fünf Standorte erfolgte die N-Ausbringung mit Zentrifugalstreuern (Schleuderdüngerstreuern) bei unterschiedlichen Arbeitsbreiten von 18 - 36 m. Dabei kam auf dem Standort Kassow (Schlag *III-3*) neben einem Zentrifugalstreuer auch ein Pneumatik-Auslegerstreuer (TERRA-GATOR 8103) zum Einsatz, während auf dem Standort Beckum (Schlag *Autobahn*) ausschließlich Flüssigdünger appliziert wurde.

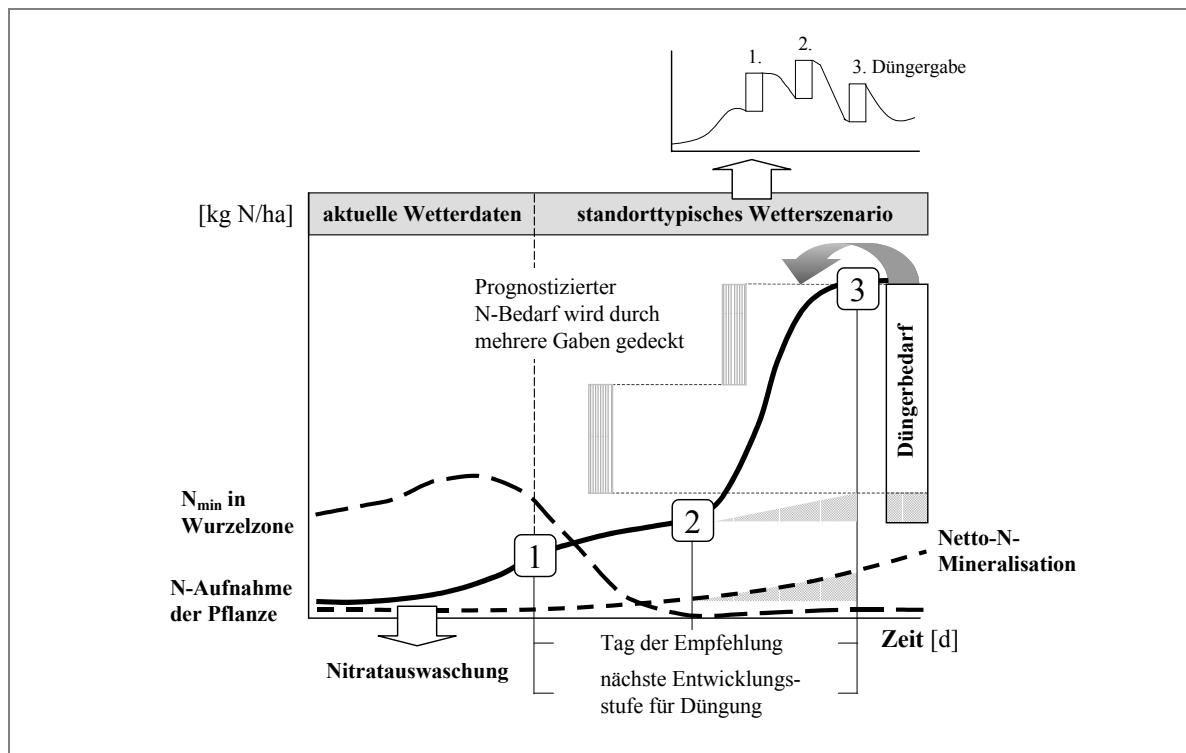
Der verwendete Pneumatik-Auslegerstreuer zeigte in Düngungsversuchen bei der Querverteilung eine durchschnittliche Deviation (um den Sollwert) von 17.0 % (WELTZIEN et al., 2002). Deutlich besser schnitten hierbei die Zentrifugalstreuer ab (Deviation von durchschnittlich 9.4 %).

Eine Verbesserung des Streubildes wurde ebenfalls mit zunehmender Düngermenge bei allen Streuertypen beobachtet. Weitere Informationen zu Technikvergleichen sind bei WELTZIEN & PERSSON (2001) und WELTZIEN et al. (2002) zu finden.

## 2. Modellbasierte N-Düngerbedarfsermittlung mit dem N-Modell HERMES

Bei der simulationsbasierten Düngerbedarfsermittlung ergibt sich der Stickstoffbedarf aus der Differenz zwischen dem N-Bedarf der Pflanze und dem N-Angebot des Bodens. Abb. 4.16 zeigt ausgehend von einer klassischen N<sub>min</sub>-Bestimmung zu Vegetationsbeginn wie sich während der nachfolgenden Vegetationsperiode aufgrund zeitlicher Veränderungen des N<sub>min</sub>-Vorrats (z.B. durch Mineralisation, Nitratauswaschung) bzw. einer veränderten räumlichen Koinzidenz von N<sub>min</sub> und Durchwurzelung eine zeitliche Staffelung des durch Düngung zu deckenden zusätzlichen N-Bedarfs ergibt.

Will man eine räumlich differenzierte Düngerbedarfsermittlung auf der Basis von N<sub>min</sub>-gehalten machen, so bedeutet dies, dass in jedem Frühjahr eine aufwendige Bodenbeprobung durchzuführen ist. Allein der Arbeits- und Kostenaufwand hierfür wäre enorm. Aufgrund der hohen zeitlichen Dynamik des Mineralstickstoffs im Boden würde die Messung aber nur eine Momentaufnahme darstellen, die je nach Standort nur eine begrenzte Aussagekraft für die Düngungsbemessung besitzt.



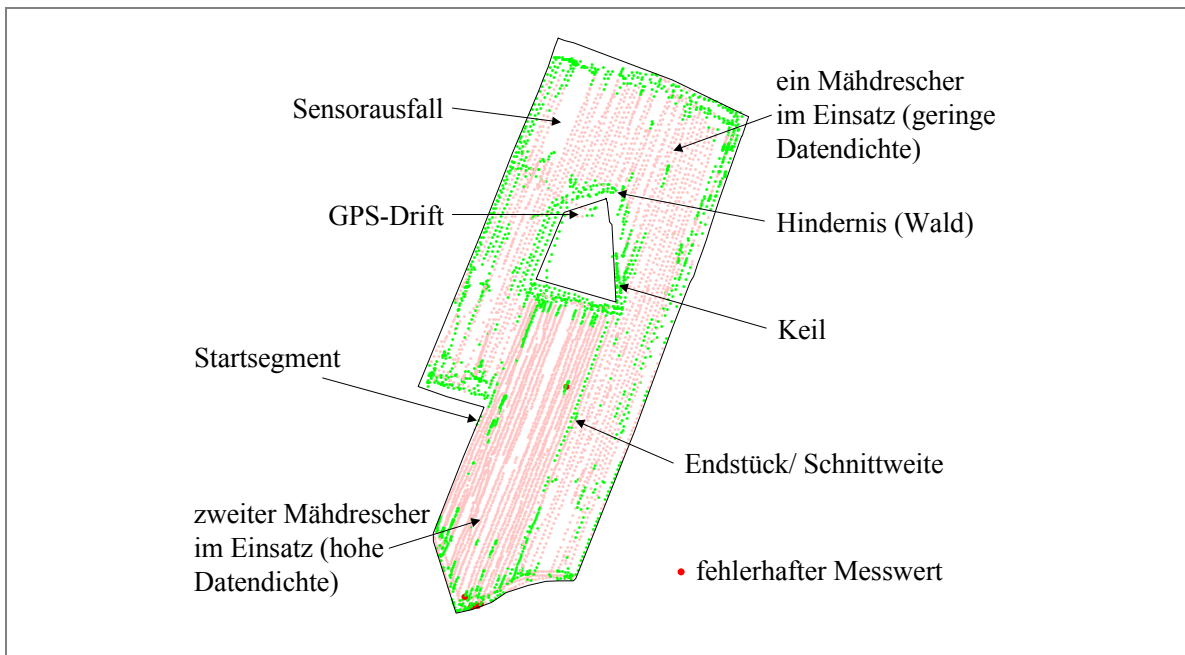
**Abb. 4.16:** Prinzip der modellbasierten N-Düngerbedarfermittlung nach N-Modell HERMES (KERSEBAUM & BEBLIK, 2001)

Durch die Simulation der wesentlichen Prozesse im System Pflanze-Boden in Abhängigkeit von der aktuellen Witterung lassen sich diese Veränderungen nachvollziehen und eine Bestimmung der aktuellen N-Versorgung ist zu jedem beliebigen Zeitpunkt möglich. Ein großer Vorteil der Simulation ist, dass die N-Dynamik sich im wesentlichen auf statische (wie Textur) oder nur langsam veränderbare Parameter (wie  $C_{\text{org}}$ ) zurückführen lässt, sodass deren Verteilungsmuster nur einmalig bestimmt werden müssen. Weitere notwendige Inputgrößen beziehen sich entweder auf Ertragsdaten, die heute meist räumlich differenziert vorliegen oder auf Bewirtschaftungsdaten, die ohnehin in der Ackerschlagdatei aufgezeichnet werden. Der prognostizierte N-Bedarf wird meist in mehrere N-Gaben aufgeteilt. Für jede Entwicklungsstufe (Schossen, Kornfüllungsphase u.a.) gibt das Programm eine Düngemenge und ein Düngungsfenster an. Da die aktuelle Witterung über die Vegetationsperiode zu Beginn der N-Bedarfermittlung nicht bekannt ist, wird auf standorttypische Wetterszenarien zurückgegriffen. Zum Einsatz kommt die Bedarfermittlung nach N-Modell HERMES in dieser Arbeit bei der simulierten Bewirtschaftung mit unterschiedlichen Ausgangsinformationen (Kap. 5.3.2) sowie beim Vergleich von unterschiedlichen Düngungsszenarien (Kap. 5.4.3).

### 4.3.6 Ertragskarten

Die Ertragskartierung ist eine wichtige und gleichzeitig kostengünstige Informationsquelle um Heterogenitäten innerhalb von Flächen zu ermitteln. Die Datenerfassung erfolgt durch eine Positionsbestimmung mit DGPS (Koordinaten und Zeit), so dass das Messsystem die Ertragsdaten geocodiert auf einen Datenlogger schreibt. Die Decodierung der Ertragsdaten erfolgt durch ein automatisches Programm (MUHR & NOACK, 2002). Die Ertragsrohdaten sind aber mehr oder weniger stark fehlerbehaftet und so ist eine Fehlerkorrektur unumgänglich. GRIEPENTROCK (1998) und ISENSEE et al. (1999) listen häufige Fehlerquellen, die bei der Ertragskartierung eine Rolle spielen, wie folgt auf (Abb. 4.17):

- Korndurchsatz-/Kornfeuchtemessung (systembedingte Fehler, Eichung),
- Flächenermittlung (Schnittbreite),
- Datensynchronisation (Transport des Erntegutes im Mähdrescher von Druschbeginn bis zur Einstellung eines dynamischen Gleichgewichtes),
- Positionsermittlung (DGPS-Bestimmung/Durchlaufzeit des Erntegutes/Ertragsmessung/GPS-Antenne),
- Kornverluste (Aufnahme/Dreschtrommel/Reinigung/Schüttler) und
- Schwarzbesatz (Verunreinigungen in Erntegut).



**Abb. 4.17:** Darstellung möglicher Fehlerquellen bei der Ertragskartierung für Schlag *Autobahn*

Die Fehlerkorrektur läuft in zwei Schritten ab. Zuerst werden alle Fehl- (ohne Messwert) und Nullstellen verworfen. In einem zweiten Lauf werden alle Extrempunkte, die oberhalb und unterhalb der zweifachen Standardabweichung vom Mittelwert liegen, entfernt (JÜRSCHIK et al., 1999). Diese korrigierte Ertragskarte wird für die Ertragsermittlung am Bohrpunkt verwendet. Um jeden Probenahmepunkt wird ein Untersuchungsradius von 10 m gelegt und mit den korrigierten Ertragswerten verschnitten. Alle Ertragsmessungen im 10 m Radius des jeweiligen Probenahmepunktes werden gemittelt. Der Mittelwert gilt als Referenzwert für die Validierung. Neben der Standardabweichung, die als Güte für die Messwerterfassung gilt, wird auch die Anzahl der Ertragsmesspunkte mit erfasst.

Für die Identifizierung stabiler Ertragszonen werden die korrigierten Ertragsdaten zur besseren Vergleichbarkeit in relative Erträge umgerechnet. Durch diese Umrechnung können alle Fruchtarten direkt miteinander verglichen werden. Die Ertragsdaten werden unter Berücksichtigung der Standardabweichung in drei Zonen (hoch, mittel und niedrig) unterteilt. Alle Erträge, die um mehr als die halbe Standardabweichung vom Mittelwert abweichen, fallen entweder in die Ertragszone hoch (+1) oder niedrig (-1). Ist der Abstand zum Mittelwert kleiner oder gleich der halben Standardabweichung werden die Messwerte der sogenannten mittleren Ertragszone zugerechnet und mit Null codiert (HEERMANN et al., 2003). Um wiederkehrende stabile Zonen ausweisen zu können, werden die Ertragskarten einheitlich gerastert und die Ertragscodierungen aufsummiert. Je mehr Ertragskarten in die Berechnung eingehen, umso geringer wird der Einfluss von Einzelereignissen, die durch Witterung, Vorfrucht oder Bearbeitungsmaßnahmen hervorgerufen werden (GRENZDÖRFFER & GEBBERS, 2001; JOERNSGAARD & HALMOE, 2003).

#### 4.4 Auswertungsmethode – Geostatistik

Die Geostatistik ist ein Teilgebiet der Statistik, die versucht, die räumlichen Abhängigkeiten und Strukturen von gemessenen Eigenschaften zu quantifizieren und aufgrund dieses Wissens Eigenschaften an unbeprobten Orten zu berechnen. Dies geschieht z.B. durch die Variogrammanalyse oder das sog. Kriging (ISAACS & SRIVASTAVA, 1991).

Die Methoden der Geostatistik basieren auf der These der *regionalisierten Variablen*, auf *Zufallsfunktionen* und auf der *Stationarität*. Bevor die eigentlichen Methoden beschrieben werden, sollen diese drei Begriffe kurz erläutert werden.

##### Regionalisierte Variablen (ReV):

Regionalisierte Variablen sind durch eine räumliche Verteilung gekennzeichnet, die neben einer zufälligen, lokalen Variation auch eine globale Variation mit einer gewissen räumlichen Struktur besitzen.

##### Zufallsvariable (Random Variable = RV)

Eine Zufallsvariable  $Z$  (z.B. Tongehalt im Boden) nimmt bestimmte Werte an, die durch eine Wahrscheinlichkeitsfunktion beschrieben wird. Eine Beobachtung ist eine einzelne Realisation von  $Z$  im Punkt  $x$  und so stellt  $x$  bei Anwendung im Raum die Lagevariable dar, die je nach Fragestellung 1-3 Dimensionen bezeichnet. Eine Menge von Zufallsvariablen  $Z(x)$  in einem Gebiet heißt Zufallsfunktion. Eine Beprobung liefert  $k$  Beobachtungen  $z_i(x_i)$  der RV  $z_i$  und ist eine Realisation der Zufallsfunktion. Diese Definition der Zufallsfunktion gibt sowohl die zufällige als auch die strukturelle Komponente der ReV wieder. Für jedes Punktepaar  $x_1$  und  $x_1+h$  ( $h$  = gerichtete Entfernung) sind die dazugehörigen Zufallsvariablen  $Z(x_1)$  und  $Z(x_1+h)$  räumlich abhängig.

##### Stationarität:

Eine weitere Voraussetzung für die These der regionalisierten Variablen ist die sog. Stationarität 2. Ordnung, die besagt, dass

- (1) der Erwartungswert ( $E$ ) für alle Punkte  $x$  existiert (geschätzt durch  $m$  = Mittelwert) und nicht von  $x$  abhängt, d.h.:

$$E[Z(x)] = m \quad \text{für alle } x, \quad (4.2)$$

- (2) für jedes Paar von Zufallsvariablen  $\{Z(x), Z(x+h)\}$  die Kovarianz ( $C$ ) existiert und von der Entfernung  $h$  abhängt:

$$C(h) = E[Z(x) - m][Z(x+h) - m] \quad \text{für alle } x. \quad (4.3)$$

Liegt in dem betrachteten Gebiet ein Trend vor, muss eine schwächere Form der Stationarität, die sog. *intrinsische Hypothese* angenommen werden:

- (1) wie bei 2. Ordnung,
- (2) für alle gerichteten Entfernungen  $h$  hat  $[Z(x)-Z(x+h)]$  eine endliche Varianz ( $\text{Var}$ ), die nicht von  $x$  abhängt:

$$\text{Var}[Z(x) - Z(x + h)] = E\{[Z(x) - Z(x + h)]^2\} = 2\gamma(h) \quad \text{für alle } x. \quad (4.4)$$

Teilt man die Gleichung 4.4 durch 2, so ergibt sich die sog. *Semivarianz* ( $\gamma$ ), die vom Vektor  $h$  abhängt:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[z(x) - z(x + h)]^2 \quad \text{für alle } x. \quad (4.5)$$

Der Begriff Semivarianz für die Varianz ( $s^2$ ) eines Punktepaares mit bestimmter Distanz wird dadurch geprägt, dass diese gleich der Hälfte des Abweichungsquadrates zwischen den Punkten ist:

$$s^2 = \frac{1}{2} [z(x) - z(x + h)]^2. \quad (4.6)$$

Wenn die Voraussetzungen für die intrinsische Hypothese erfüllt sind, kann der gleiche Grad an Abweichung eines Merkmals für jedes beliebige, um die Distanz  $h$  entfernte Punktepaares erwartet werden, unabhängig vom aktuellen Wert des Merkmals.

#### 4.4.1 Variogrammanalyse

Jede geostatistische Studie beginnt mit der Konstruktion eines Modells zur Charakterisierung der räumlichen Struktur der regionalisierten Variablen. Die Semivarianz beschreibt dabei die räumliche Struktur und hängt unter den Voraussetzungen der Theorie der Regionalisierten Variablen nur von der gerichteten Entfernung  $h$  zwischen zwei Punkten ab und nicht von ihrer geographischen Lage  $x$ . Experimentell lässt sich die Semivarianz der Entfernung  $h$  als die durchschnittliche quadratische Abweichung zwischen allen Beobachtungspaaren mit dieser Entfernung bestimmen:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (4.7)$$

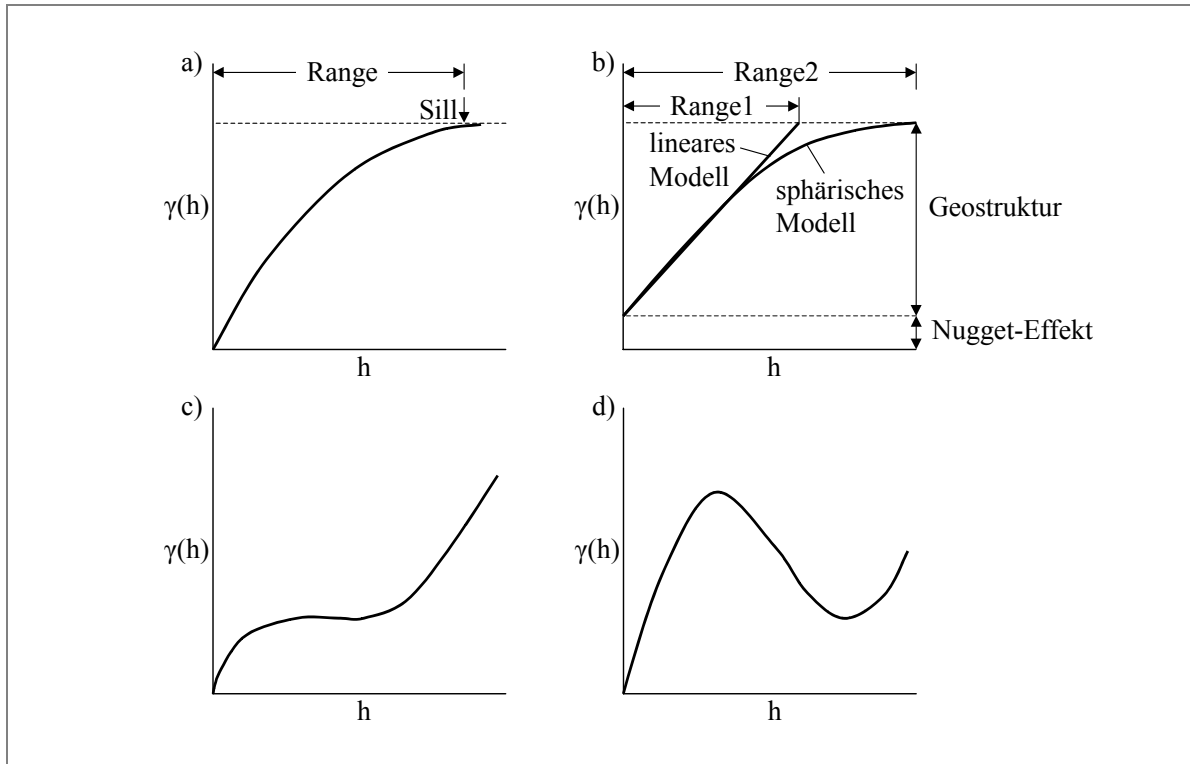
mit  $N(h)$  Beobachtungspaaren. Trägt man in einem Diagramm für eine bestimmte Richtung die Semivarianz  $\gamma(h)$  gegen die Entfernung  $h$  auf, so erhält man das sog. (Semi-)Variogramm.

Im Idealfall steigt die Semivarianz mit der Entfernung und nähert sich innerhalb einer bestimmten Distanz, der Reichweite (Range)  $a$ , einem konstanten Wert, der als Schwellenwert (Sill) bezeichnet wird an (Abb. 4.18, a). Bei stationären Daten entspricht der Sill der Stichprobenvarianz des Gesamtareals. Eine räumliche Beziehung zwischen den Beobachtungspaaren besteht nur innerhalb der Reichweite und deswegen ist nur innerhalb dieser Reichweite eine Interpolation sinnvoll.

Theoretisch geht die Semivarianz für den Fall  $h = 0$  durch den Ursprung, doch für Bodenmerkmale trifft dies im allgemeinen nicht zu. Ist die Semivarianz bei der Entfernung  $h = 0$  größer Null, wird dies als Kernvarianz ( $c_0$  auch Nugget-Effekt genannt) bezeichnet (Abb. 4.18, b). Der Nugget-Effekt beschreibt die Höhe der unerklärten Varianz, die in einem kleineren Bereich als dem Beobachtungsabstand auftritt und durch Mess- und Stichprobenfehler bzw. durch die Varianz innerhalb des Probenvolumens verursacht wird. Besteht eine sehr große Varianz von Punkt zu Punkt, so wird diese als reiner Nugget-Effekt bezeichnet. Der reine Nugget-Effekt deutet eine räumliche Unabhängigkeit der Merkmalswerte an.

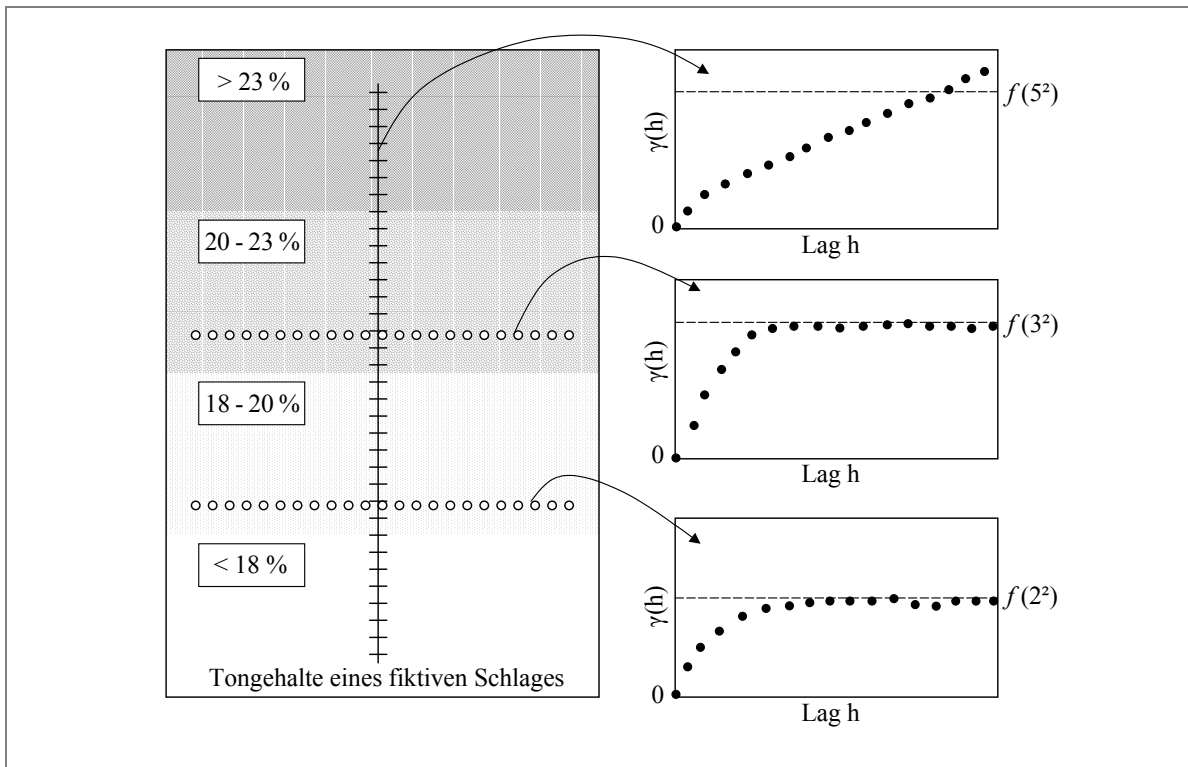


Für die Einbeziehung der Semivarianz in die Berechnung der Gewichtungen für die Stützpunkte bei der *Kriging-Interpolation* werden den berechneten, experimentellen Semivariogrammen Modelle angepasst. Am häufigsten werden lineare und sphärische Modelle mit und ohne Nugget-Effekt verwendet (Abb. 4.18, b). Variieren die Eigenschaften in einem bestimmten Gebiet nicht zufällig, sondern folgen einem starken Trend (auch *Drift* genannt), d.h. die Erwartungswerte der Eigenschaften hängen von der geographischen Lage ab, so spiegelt sich dies in einem parabolischen Verlauf des Variogramms im Bereich großer Entfernungen wider (Abb. 4.18, c). In diesem Fall ist die intrinsische Hypothese verletzt und eine Sonderform des Kriging kommt zu Einsatz, das sog. *Universal Kriging* (siehe Kap. 4.2.2; BURGESS & WEBSTER, 1980).



**Abb. 4.18:** Grafische Darstellung: a) idealisiertes Variogramm ohne Nugget-Effekt, b) lineares und sphärisches Variogrammmodell mit Nugget-Effekt, c) Variogramm mit Trend, d) Variogramm mit Hole-Effekt

Periodische Änderungen der Merkmalswerte, verursacht durch geographische und geomorphologische Prozesse oder bestimmte Nutzungsformen (z.B. Reihenkultur), sind im Variogramm als *Hole-Effekt* ersichtlich, d.h. die Semivarianz steigt nicht monoton mit der Entfernung (Abb. 4.18, d). Bodenmerkmale variieren meist ungleichmäßig in vertikaler und horizontaler Richtung (SINOWSKI, 1995; Abb. 19). Dies wird in der Geostatistik als Anisotropie bezeichnet und kann in Form besonderer Semivariogramm-Modelle beim Kriging berücksichtigt werden.



**Abb. 4.19:** Anisotropie – Semivariogramme einer Bodenbeprobung entlang dreier Transekte in einem Schlag mit ungleichmäßiger Tonverteilung (NIELSEN & WENDROTH, 2003)

Aus Semivariogrammen kann darüber hinaus auch die optimale Stichprobengröße für die Schätzung mit vorgegebene Fehler abgeleitet werden. Die klassische Statistik schätzt den Stichprobenumfang ( $n$ ) mit Hilfe der Formel:

$$n = \frac{t^2 * s^2}{(x - \mu)^2} \quad (4.8)$$

ab, mit  $t$  für Student's  $t$ -Wert,  $s^2$  für Varianz und  $x - \mu$  als tolerierbarem Fehler. Bei der Schätzung wird jedoch vorausgesetzt, dass die Merkmalswerte voneinander unabhängig sind. Bei räumlich abhängigen Merkmalswerten wird die Varianz und damit auch der benötigte Stichprobenumfang oft überschätzt. Ist das Semivariogramm eines Merkmals bekannt, so kann die zu erwartende Kriging-Varianz bzw. der zu erwartende Schätzfehler schon vor der eigentlichen Probenahme aus dem Variogramm berechnet werden (BURGESS et al., 1981; MCBRATNEY et al., 1981), so dass der optimale Probenahmeabstand für einen gesetzten Fehler bestimmt werden kann. Da aber die Bestimmung der Schätzvarianz theoretisch sehr umstritten ist (PHILIP & WATSON, 1986) und außerdem das Variogramm nicht schon vor der Probenahme bekannt ist, soll auf diese Möglichkeit nicht näher eingegangen werden.

#### 4.4.2 Kriging

Die Vorhersage von Merkmalswerten an nicht beprobten Orten erfolgt in der Geostatistik mit Hilfe des sog. *Krigings*. Dies ist ein Interpolationsverfahren mit gewichteter, lokaler Mittelwertbildung, bei dem die Wichtungen so gewählt werden, dass die Schätzung (ohne Bias) unverzerrt und die Schätzvarianz minimal ist (BURGESS & WEBSTER, 1980). Ein nützlicher Nebeneffekt des *Krigings* stellt die bereits erwähnte, gleichzeitige Ermittlung des möglichen Schätzfehlers aus dem Semivariogramm dar. Dieses Interpolationsverfahren

eignet sich besonders bei Daten, die gute räumliche Strukturen zeigen und deren Probenahmeweite geringer als die Reichweite des Semivariogramms ist.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Kriging-Methoden kurz vorgestellt werden.

### 1. Punkt- und Block-Kriging

Typisch für eine Interpolation ist der Fall, dass eine Stichprobe mit Merkmalswerten  $z(x_i)$  für verschiedene Orte  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  vorliegt und der Merkmalswert an einem bestimmten, nicht untersuchten Ort B geschätzt werden soll. Der Ort B wird als Punkt bezeichnet, wenn er dieselbe Ausdehnung wie die einzelnen Proben besitzt. Ist er größer, so stellt er eine Fläche oder einen *Block* dar. Dementsprechend wird die Schätzmethode *Punkt-* oder *Block-Kriging* genannt. Der Wert für das nicht beprobte Gebiet errechnet sich wie folgt:

$$z_B = \sum_{i=1}^N z_i * \lambda_i \quad (4.9)$$

wobei  $z_B$  der interpolierte Wert ist, N die Anzahl der Nachbarpunkte und  $z_i * \lambda_i$  die gemessenen Nachbarwerte multipliziert mit einem Gewichtungsfaktor. Die Summe der Gewichtungsfaktoren muss 1 ergeben.

Die folgende Formel berechnet die Varianz für nicht beprobte Gebiete:

$$\sigma_{(z_B)}^2 = \mu + \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma_{i_B} \quad (4.10)$$

wobei  $\lambda$  die geschätzte Varianz ist,  $\mu$  der Lag-Range Multiplikator und  $\gamma$  die Semivarianz an der Trenndistanz zwischen Messpunkten und interpolierten Punkten.

Des Weiteren ist beim *Punkt-Kriging* für die Suche nach der passenden Anzahl von Nachbarn folgendes zu beachten:

Für isotropes Kriging sollte der Suchradius so eingestellt werden, dass mindestens 6 - 8 und maximal 16 - 24 Nachbarpunkte in die Berechnung einfließen. Dies würde für ein 50 m Raster einen Suchradius von  $> 71$  m bedeuten. Am besten ist, wenn der Suchradius die Hälfte der Reichweite des Semivariogramms oder weniger beträgt. Nicht immer ist dies möglich, weil zu wenig Punkte in die Berechnung einfließen. Bei einem regelmäßigen Proberaster sollte daher ein fester Suchradius angenommen werden. Bei unregelmäßig verteilten Proberastern oder Clustern hat sich ein flexibler Suchradius bewährt um die Anzahl der Nachbarpunkte zu definieren.

Für anisotropes (richtungsbezogenes) Kriging ist der Suchradius elliptisch. Die längste Achse des Suchradius hat die Richtung, in der das Variogramm die längste Reichweite hat, und die kürzeste in der Richtung mit der kürzesten Reichweite.

## 2. Universal-Kriging

*Universal-Kriging* wird benutzt, wenn in einem Gebiet ein Trend vorliegt, d.h., dass die Veränderung nicht nur von der Entfernung abhängt, sondern auch von der geographischen Lage. Für den Fall, dass ein starker Trend in einer Schätzumgebung existiert und aufgrund der geringen Anzahl an Beobachtungspunkten nicht die Möglichkeit besteht, die Umgebung zu verkleinern und so Quasi-Stationarität zu erreichen, gibt es das *Universal-Kriging*, das die Trendfunktion mit in die Schätzung einbezieht. Problematisch ist die Bestimmung des Trends und der Semivarianz der Residuen. Das Punkt-Kriging ist im Hinblick auf die Voraussetzungen der Stationarität relativ robust, und deshalb sind die Unterschiede der Ergebnisse zwischen dem Universal-Kriging und dem Punkt-Kriging nur sehr gering (OTTE, 1988; HERBST, 2002).

## 3. Co-Kriging

In der Bodenkunde kommt es vor, dass die räumliche Verteilung einer Variablen von der räumlichen Verteilung einer anderen (statistisch) abhängig ist. In diesem Fall spricht man von coregionalisierten Variablen. Das *Co-Kriging* ist das dem normalen Kriging analoge Verfahren zur Interpolation von zwei oder mehr coregionalisierten Variablen. Genutzt wird das *Co-Kriging* meist, wenn eine Variable z.B. aus Kostengründen nur in einer wesentlich geringeren Dichte vorliegt als eine räumlich korrelierende Variable, die billiger und mit weniger Aufwand zu erheben ist.

Voraussetzungen für das Co-Kriging sind die Variogramme beider Variablen, die für das Crossvariogramm als Messparameter für die räumliche Zusammengehörigkeit der beiden Untersuchungsparameter benötigt werden. Das Crossvariogramm kann nur berechnet werden, wenn die intensiv beprobte Variable an bestimmten Stellen auch durch die nicht so intensiv beprobte Variable an derselben Stelle durchgeführt wurde. Die intensiv beprobte Variable (1) muss für jede Stelle der nicht so intensiv beprobten Variable (2) vorhanden sein.

Semi-Covarianz:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2} n(h) \sum_{i=1}^n [z_{1i} - z_{1,i+h}] [z_{2i} - z_{2,i+h}] \quad (4.11)$$

$z_{1i}$  und  $z_{1,i+h}$  sind die gemessenen Werte für die Variable 1 an den Punkten  $i$  und  $i+h$  und

$z_{2i}$  und  $z_{2,i+h}$  sind die gemessenen Werte für die Variable 2 an den Punkten  $i$  und  $i+h$ .

Bei der Interpolation mit Co-Kriging werden ähnlich wie bei Punkt-Kriging, Gewichtungsfaktoren für die beiden Variablen abgeschätzt. Interpolierte Werte für die zweite Variable (der weniger eng beprobten,  $z_{20}$ ) werden durch nachfolgende Formel errechnet:

$$z_{20} = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} * z_{1i} + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} * z_{2j} \quad (4.12)$$

$\lambda_{1i}$  ist der Gewichtungsfaktor für die Variable 1 am Punkt  $i$  sowie  $\lambda_{2j}$  der Gewichtungsfaktor für die Variable 2 am Punkt  $j$ ,  $z_{1i}$  der gemessene Wert am Punkt  $i$  und  $z_{2j}$  die Variable 2 am Punkt  $j$ .

Die Schätzvarianz wird bei Co-Kriging nach folgender Formel berechnet:

$$\sigma_0^2 = \mu_2 + \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} * \gamma_{12,j0} + \sum_{j=0}^{N_2} \lambda_{2j} * \gamma_{22,j0} \quad (4.13)$$

$\sigma_0^2$	geschätzte Varianz,
$\mu_2$	Lag-Range Faktor für die Variable 2,
$\lambda_{1i}$	Gewichtungsfaktor für den i-ten Punkt der Variablen 1,
$\lambda_{2j}$	Gewichtungsfaktor für den j-ten Punkt der Variablen 2,
$\gamma_{12,j0}$	Crosssemivarianz innerhalb einer Distanzklasse am Punkt i und einem unbeprobten Punkt und
$\gamma_{22,j0}$	Semivarianz der Variablen 2 innerhalb einer Distanzklasse am Punkt j und einem unbeprobten Punkt.

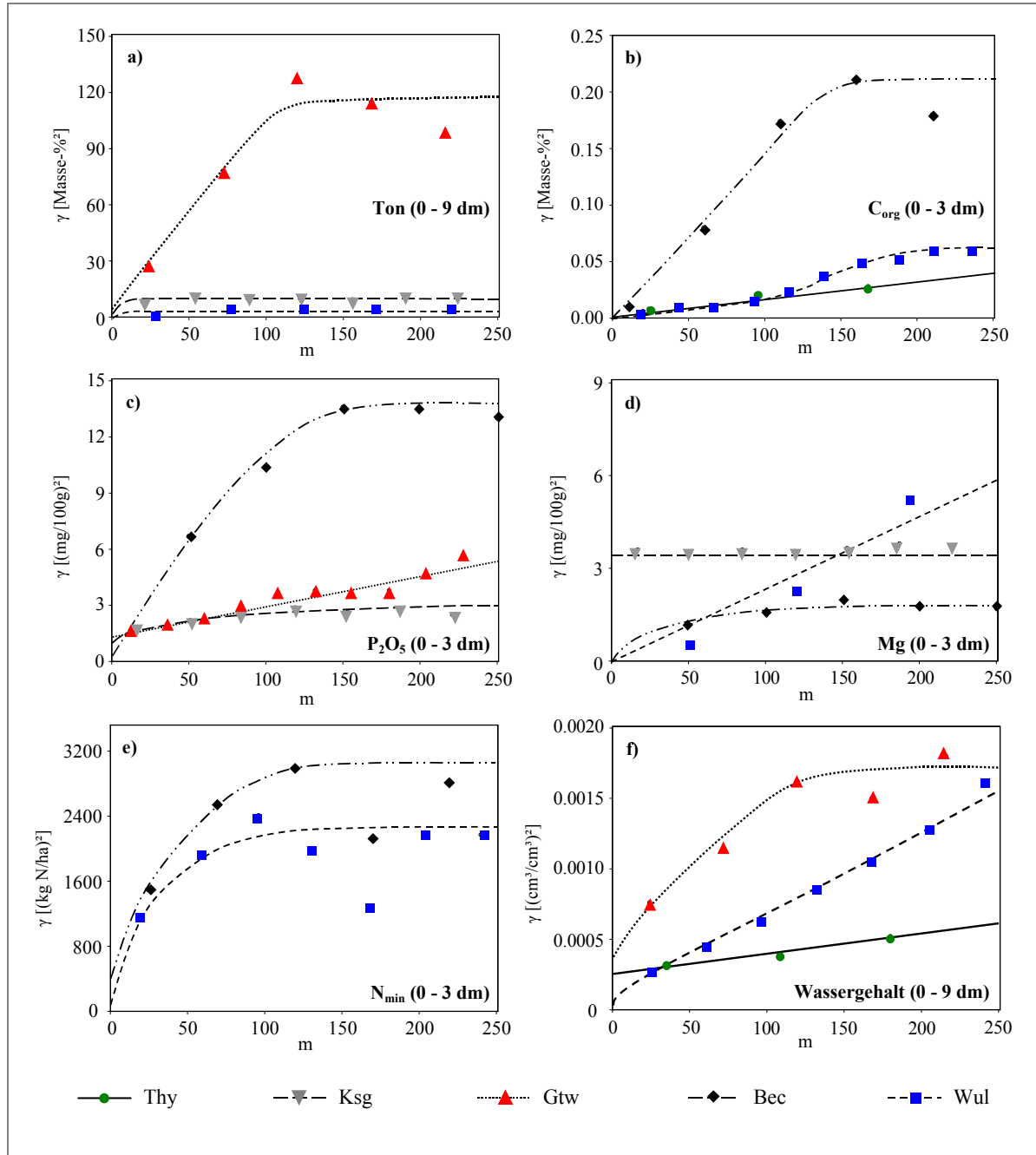
Neben dem Kriging gibt es aber auch neuere Verfahren in der Geostatistik, die nicht zwingend auf die Voraussetzung der Stationarität angewiesen sind, wie autoregressive Methoden (z.B. *state-space analysis*; WENDROTH et al., 1997; NIELSEN & WENDROTH, 2003).

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Räumliche Variabilität

#### 5.1.1 Geostatistische Analyse der Basisdaten

Für die auf den Untersuchungsschlägen erhobenen Boden- und Nährstoffdaten wurden Variogrammanalysen durchgeführt, um einen ersten Überblick hinsichtlich der räumlichen Variabilität zu erhalten. Abb. 5.1 zeigt Variogramme für unterschiedliche Bodenmerkmale.



**Abb. 5.1:** Variogramme für verschiedene Bodenparameter

Die Form (sphärisch, exponential u.a.) und die Lage (bestimmt durch den Nugget und die Reichweite bei Maximalvarianz) der Variogrammfunktionen für die untersuchten Parameter unterscheiden sich zwischen den einzelnen Standorten teilweise sehr stark voneinander. So findet man im Jungmoränengebiet von Kassow (Ksg) oft lineare und exponentiale Variogrammfunktionen mit mittlerer Reichweite bei den Nährstoffparametern Phosphor, Kalium und Magnesium (Abb. 5.1, c und d; Tab. 5.2) vor.

Während im mecklenburgischen Jungmoränengebiet um Kassow exponentiale Variogrammfunktionen mit mittleren Reichweiten auch beim Wassergehalt anzutreffen sind, kommen im Schleswig-Holsteiner Jungmoränengebiet (Thy) eher lineare und gaussische Variogrammfunktionen für diese Kenngröße in Frage (Abb. 5.1, f; Tab. 5.3). Hohe Nugget-Effekte mit mittleren und hohen Reichweiten findet man hingegen auf Schlag *Autobahn* (Bec) in Nordrhein-Westfalen (Abb. 5.1, b, c, e; Tab. 5.1 bis 5.3) sowie auf *Kamp-Ost* (Gtw) in Niedersachsen (Abb. 5.1, a, c, f; Tab. 5.1 bis 5.3) vor. Den Schlag *Finkenherd* (Wul) in der sächsisch-anhaltinischen Lössbörde kennzeichnen große Reichweiten und geringe Nugget-Effekte (Abb. 5.1, a, b, e; Tab. 5.1 und 5.3). Hier werden oft sphärische und lineare, manchmal auch gaussische Variogrammfunktionen beim Eyeball-Fitting (visuelle Anpassungsmethode) verwendet. Eine Ausnahme stellen lediglich die Bodenparameter Ton und Sand dar, die eine exponentiale Variogrammfunktion bei geringer Reichweite aufweisen (Abb. 5.1, a).

Die Ergebnisse der Geostatistik lassen auf den untersuchten Schlägen die Schlussfolgerung zu, dass Bodenlandschaften sich nicht nur territorial stark in Form und Lage bei der Variogrammanalyse unterscheiden sondern auch innerhalb von gleichartigen Bodenlandschaften wie den Jungmoränengebieten in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern große Unterschiede aufweisen können. So kann nicht direkt von der Bodenlandschaftsform auf die geeignete Beprobungsdichte für den zu untersuchenden Parameter geschlossen werden.

Eine Möglichkeit um erste Anhaltspunkte zur Schlagheterogenität zu erhalten, bietet die Einbeziehung von Standarddaten (wie der Reichsbodenschätzung) in die Beprobungsplanung. So wird geschlussfolgert, je heterogener eine Fläche ausgewiesen wird, desto intensiver (engmaschiger) sollte diese beprobt werden. Im Falle des sehr homogenen Schlages *Feldscheide-links* (Thy) konnte aber keine Struktur bei den Texturwerten Sand und Ton gefunden werden. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind die Rasterweiten mit 72 m zu groß gewählt worden. Die räumliche Abhängigkeit liegt in deutlich geringeren Abständen vor. Aber auch deutlich geringere Rasterweiten von 34 m, die stellenweise bis auf 8 m untersetzt werden, wie auf Schlag *III-3* (Ksg) zeigen ebenfalls keine Struktur bei Sand und organischem Kohlenstoff. D.h. räumliche Abhängigkeiten können z.T. sehr kleinräumig schon im Meterbereich auftreten.

Die Tabellen 5.1 bis 5.3 enthalten die wichtigsten Kenngrößen aus der Variogrammanalyse für die Untersuchungsschläge.

**Tab. 5.1:** Variogramm-Kenngrößen von Bodenparametern

Schlag- kürzel	Messgröße [Masse-%]	Tiefe [dm]	Anzahl [-]	Lag [m]	Nugget [Masse-% <sup>2</sup> ]	Sill [Masse-% <sup>2</sup> ]	Range [m]	Modell
Thy	Sand	0 - 9	33	72	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Ksg			151	34	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Gtw			60	48	22	142	142	Sphärisch
Bec			70	50	12	156	150	Sphärisch
Wul			45	48	29	30	73	Exponential
Thy	Ton	0 - 9	33	72	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Ksg			151	34	6	4	71	Sphärisch
Gtw			60	48	13	112	115	Sphärisch
Bec			70	50	7	45	100	Sphärisch
Wul			45	48	0	4	45	Exponential
Thy	C <sub>org</sub>	0 - 3	111	72	0	0.06	325	Linear
Ksg			181	34	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Gtw			124	24	0	0.01	88	Sphärisch
Bec			92	50	0	0.20	160	Sphärisch
Wul			141	24	0	0.15	250	Gaussisch

Bemerkung: k.S.) keine Struktur

**Tab. 5.2:** Variogramm-Kenngrößen von Nährstoffdaten

Schlag- kürzel	Jahr	Messgröße [mg/100 g]	Tiefe [dm]	Anzahl [-]	Lag [m]	Nugget [(mg/100 g) <sup>2</sup> ]	Sill	Range [m]	Modell
Ksg	1999	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0 - 3	117	34	1	2	140	Exponential
Gtw	1999			124	24	2	4	230	Linear
Bec	1999			60	50	0	135	135	Sphärisch
Wul	2000			45	72	0	31	330	Linear
Ksg	1999	K <sub>2</sub> O	0 - 3	117	34	1	10	76	Exponential
Gtw	1999			124	24	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Bec	1999			60	50	3	23	200	Sphärisch
Wul	2000			45	72	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Ksg	1999	Mg	0 - 3	117	34	3	0	150	Linear
Gtw	1999			124	24	0	4	106	Linear
Bec	1999			60	50	0	2	126	Exponential
Wul	2000			45	72	0	7	400	Linear

Bemerkung: k.S.) keine Struktur



**Tab. 5.3:** Variogramm-Kenngrößen des mineralischen Stickstoffs ( $N_{\min}$ ) und des volumetrischen Wassergehalts

Schlag- kürzel	Jahr	Messgröße [kg N/ha]	Tiefe [dm]	Anzahl [-]	Lag [m]	Nugget [(kg N/ha) <sup>2</sup> ]	Sill	Range [m]	Modell
Thy	2000	$N_{\min}$	0 - 3	115	72	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
			3 - 6			k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
			6 - 9			k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
			0 - 9			k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Ksg	1999	$N_{\min}$	0 - 3	181	34	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
			3 - 6			110	27	50	Linear
			6 - 9			10	45	161	Sphärisch
			0 - 9			k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Gtw	1999	$N_{\min}$	0 - 3	124	48	k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
			3 - 6			k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
			6 - 9			k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
			0 - 9			k.S.	k.S.	k.S.	k.S.
Bec	1999	$N_{\min}$	0 - 3	92	50	312	900	108	Sphärisch
			3 - 6			1	420	76	Exponential
			6 - 9			81	82	120	Exponential
			0 - 9			557	2511	121	Sphärisch
Wul	2000	$N_{\min}$	0 - 3	141	24	464	652	98	Sphärisch
			3 - 6			249	272	131	Sphärisch
			6 - 9			1	169	77	Sphärisch
			0 - 9			118	2125	77	Exponential
		[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]				[(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ) <sup>2</sup> ]			
Thy	2000	Wasser- gehalt	0 - 3	115	72	0.0004	0.0044	315	Gaussisch
			3 - 6			0.0005	0.0010	183	Linear
			6 - 9			0.0008	0.0020	176	Linear
			0 - 9			0.0003	0.0010	228	Linear
Ksg	1999	Wasser- gehalt	0 - 3	181	34	0.0002	0.0040	43	Exponential
			3 - 6			0.0001	0.0046	43	Linear
			6 - 9			0.0003	0.0010	42	Linear
			0 - 9			0.0001	0.0030	42	Linear
Gtw	1999	Wasser- gehalt	0 - 3	124	48	0.0002	0.0002	141	Linear
			3 - 6			0.0010	0.0010	141	Linear
			6 - 9			0.0034	0.0039	124	Gaussisch
			0 - 9			0.0005	0.0010	166	Sphärisch
Bec	1999	Wasser- gehalt	0 - 3	92	50	0.0005	0.0030	104	Sphärisch
			3 - 6			0.0001	0.0030	108	Sphärisch
			6 - 9			0.0007	0.0030	131	Sphärisch
			0 - 9			0.0002	0.0025	128	Sphärisch
Wul	2000	Wasser- gehalt	0 - 3	141	24	0.0001	0.0007	131	Sphärisch
			3 - 6			0.0006	0.0060	151	Sphärisch
			6 - 9			0.0007	0.0037	230	Sphärisch
			0 - 9			0.0001	0.0022	200	Sphärisch

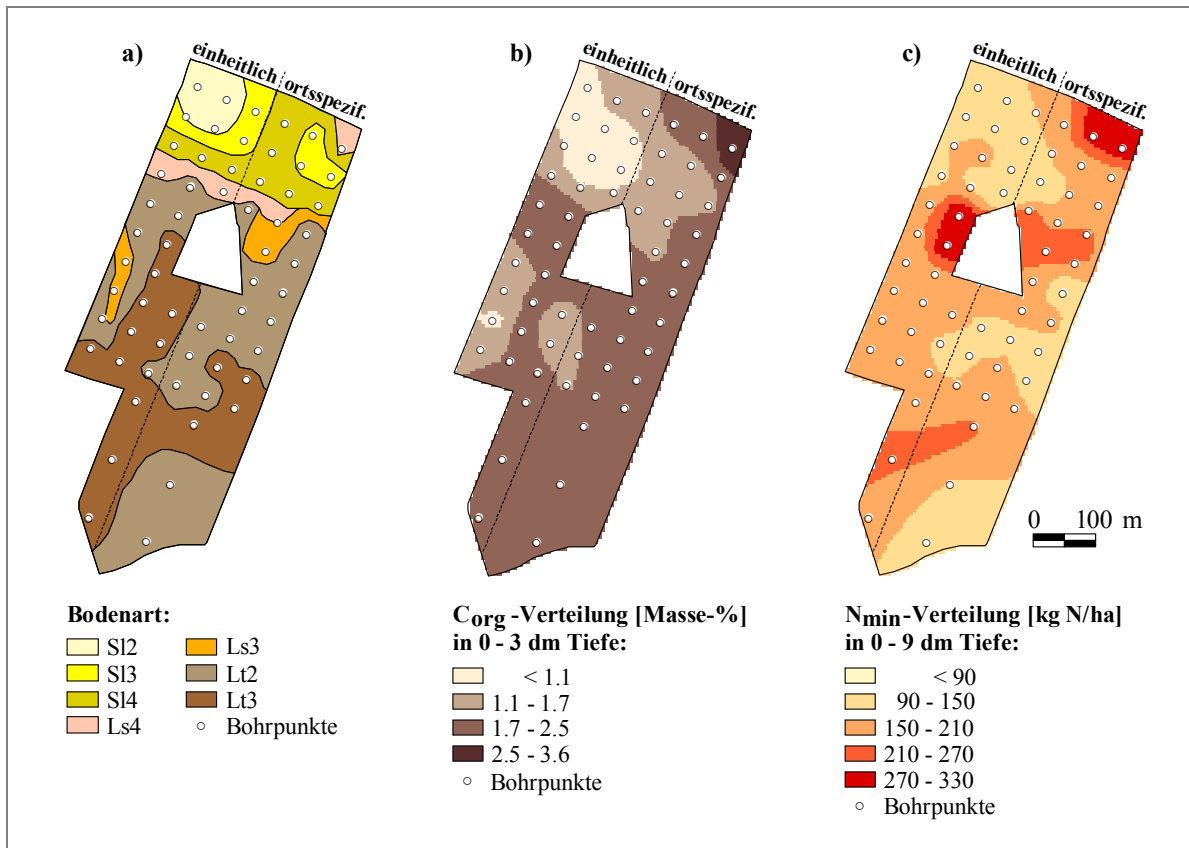
Bemerkung: k.S.) keine Struktur

In drei von fünf Fällen wird bei den  $N_{\min}$ -Werten (0 - 3 dm bzw. 0 - 9 dm Tiefe) im Herbst nach Winterweizen keine geostrukturelle Varianz in der Fläche gefunden (Tab. 5.3). Die Rastergröße ist für diesen Parameter zu groß gewählt worden, so dass die kleinräumige Varianz unberücksichtigt bleibt. In diesen Fällen werden noch geringere Messabstände gefordert. Auf den verbleibenden Schlägen mit einer Geostruktur werden dagegen kleinere

Lag-Distanzen (z.B. Wul) verwendet und zum anderen weisen die Böden deutlich höhere Texturunterschiede in der Fläche auf (siehe Bec).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die untersuchten Bodenparameter unterschiedliche Geostrukturen wie auch unterschiedliche Reichweiten (Ranges) aufweisen. Es lassen sich weder für einen Standort noch für gleiche Parameter einheitliche Reichweiten finden.

Basierend auf den vorangegangenen Variogrammanalysen können mit Hilfe von Kriging für ausgewählte Parameter Karten interpoliert werden (Abb. 5.2). Im folgenden soll auf die räumliche Verteilung von Bodeninputgrößen, die für das Modell HERMES relevant sind, am Beispiel des Schlags *Autobahn* näher eingegangen werden.



**Abb. 5.2:** Räumliche Verteilung wichtiger Modelleingangsdaten auf Schlag *Autobahn*:  
a) Bodenart nach Rasterbeprobungsdaten, b) C<sub>org</sub>-Gehalt (0 - 3 dm),  
c) N<sub>min</sub>-Verteilung (0 - 9 dm) am 15.09.99

Die Texturanalysen der Bohrpunkte zeigen für Schlag *Autobahn* eine starke Differenzierung bei der Bodenart. Im nördlichen Schlagteil sind leichtere Standorte (SI2 bis SI4) anzutreffen, während im südlichen Bereich eher tonige Lehme (Lt2 bis Lt3) zu finden sind (Abb. 5.2, a). Daraus folgt, dass der Tongehalt von Norden nach Süden deutlich zunimmt. Die mit dem steigenden Tongehalt verbundene Zunahme der Wasserspeicherkapazität wird durch den gleichzeitigen Anstieg des Steingehalts im Unterboden stark eingeschränkt. Ebenfalls beeinträchtigend wirkt sich eine nach Süden hin bis auf 6 dm unter Flur ansteigende massive Mergelschicht im Boden aus, die die Durchwurzelbarkeit des Profils und damit die Versorgung der Pflanzenbestände mit Nährstoffen und Wasser aus tieferen Bodenschichten erschwert.

Neben der Textur stellt der Gehalt an organischem Kohlenstoff (Abb. 5.2, b) ein weiteres wichtiges Bodenmerkmal dar, das sowohl die physikalischen wie auch die physikochemischen und biologischen Bodeneigenschaften prägt. Auf dem Schlag *Autobahn* korreliert der Humusgehalt eng mit dem Tongehalt, der von Nord nach Süd zunimmt ( $r^2 = 0.469$ ). Eine Ausnahme bildet der nordöstliche Schlagteil. Die ehemalige Grünlandsenke weist die höchsten Humusgehalte des Schlages auf. Stellenweise ist in dieser Senke Humus bis 6 dm Tiefe nachweisbar. Nimmt man diesen Flächenteil aus der Berechnung heraus, steigt das Bestimmtheitsmaß auf 0.694. Die von KÖRSCHENS et al. (1998) und KAHLE et al. (2002) zitierte Einbeziehung des Feinschluffanteils in die Berechnung, um das Bestimmtheitsmaß zum Humusgehalt weiter zu erhöhen, führt in diesem Fall zu keiner weiteren Verbesserung der Korrelation auf Schlag *Autobahn*.

Abb. 5.2 (c) zeigt die  $N_{\min}$ -Verteilung zu Beginn der Messung am 15.09.99. Über den Gesamtschlag gemittelt liegt die durchschnittliche  $N_{\min}$ -Menge bei 175 kg N/ha. Die Spannweite schwankt zwischen 73 und 321 kg N/ha in den oberen 9 dm. Die niedrigsten Werte werden auf den sandigen Standorten im Nordwesten gefunden, die höchsten Stickstoffgehalte auf dem ehemaligen Grünland im nordöstlichen Teil sowie westlich des Waldgebietes.

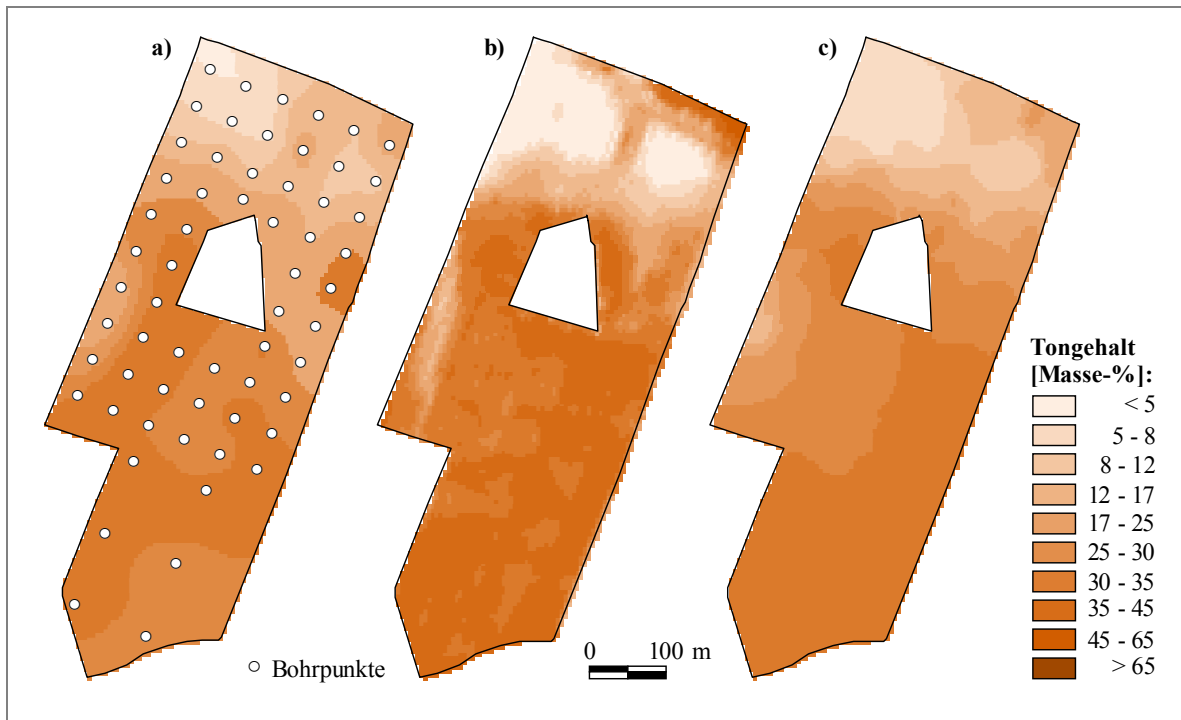
Eine der zentralen Eingabevariablen für die Modellierung wie auch für die Abschätzung des Ertragspotentials stellt die Bodenart dar, da sie die Wasserspeicherkapazität im Boden entscheidend mitbestimmt. So erfolgt die Texturanalyse an den Rasterpunkten im wesentlichen, um den Inputbedarf des Modells für die Simulation an den Probenahmepunkten zu gewährleisten. Auf der anderen Seite werden die Ergebnisse auch genutzt, um Aussagen zur Heterogenität innerhalb von Bodenkartiereinheiten abzuschätzen sowie zur Kalibrierung von inversen Messmethoden wie der elektrischen Leitfähigkeit.

Wie man Abb. 5.3 (a) entnehmen kann, zeigt die Karte der Tongehalte (0 - 9 dm) nach der Rasterbeprobung auf Schlag *Autobahn* mit Ausnahme des nordöstlichen Schlagteils ein ähnliches Verteilungsmuster wie bei der EC-Messung (Abb. 5.3, b), die in einer deutlich höheren räumlichen Auflösung vorliegt. Das Bestimmtheitsmaß zwischen beiden Messungen liegt bei 0.813, im Oberboden (0 - 3 dm) sogar bei 0.858. Im nördlichen Bereich nahe des Stelter Baches überlagert die hohe Bodenfeuchte des Gley-Standortes das Messsignal. Auf Schlag *Autobahn* mit seinen deutlichen Texturunterschieden hilft die EC-Messung bei der geostatistischen Interpolation (Kap. 4.4.2 – Co-Kriging) und verbessert die Informationsdichte für den Tongehalt kleinräumig (Abb. 5.3, c).

Dies muss aber nicht zwingend der Fall sein, wie Messungen auf Schlag *Kamp-Ost* zeigen. Das Bestimmtheitsmaß liegt hier zwischen EC-Messung und Tongehalt (0 - 9 dm) nach Rasterbeprobung bei nur 0.493 und reicht für das Co-Kriging nicht aus (Abb. 9.1). Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass zum Zeitpunkt der Überfahrt (09.04.99) Stau- und Haftnässe im Bodenprofil das EC-Signal störten.

Auf den Schlägen *Feldscheide-links* und *III-3* liegt das Bestimmtheitsmaß zwischen EC-Messung und Tongehalt bei  $< 0.150$ . Ausschlaggebend dafür scheint die geringe Variabilität der Tongehalte auf diesen Flächen zu sein.

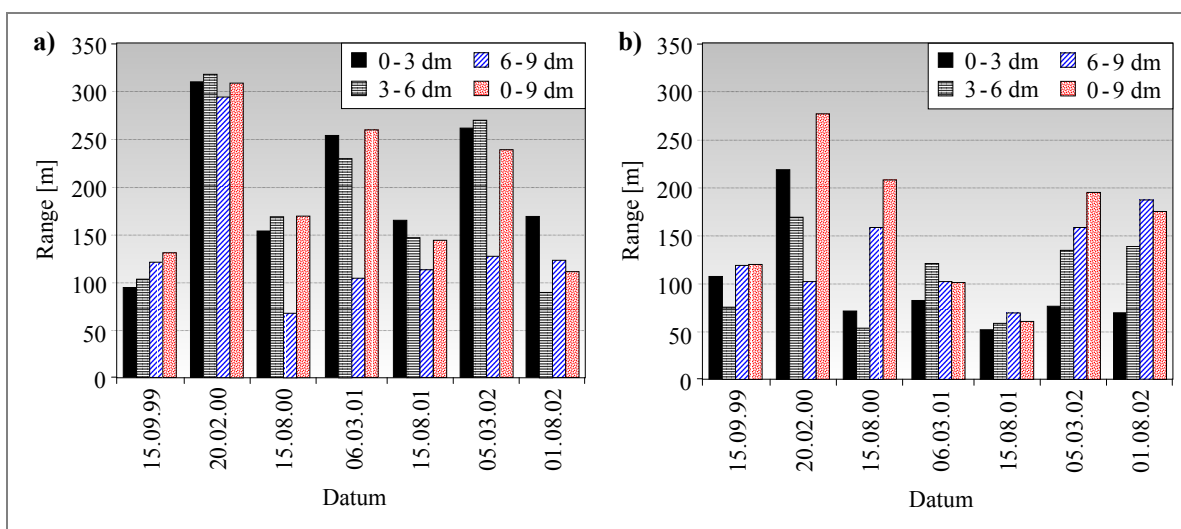
Auf eine Auswertung der EC-Messung zum Tongehalt für Schlag *Finkenherd* wird verzichtet, da nicht für alle Bohrpunkte Texturanalysen vorliegen.



**Abb. 5.3:** Tongehaltskarten vom Schlag *Autobahn*: a) mittlerer Tongehalt in 0 - 9 dm Tiefe nach Rasterbeprobung, b) Tonverteilung nach EC-Messung, c) Tongehaltsverteilung nach Co-Kriging von Rasterdaten mit EC-Messung

### Zeitliche Veränderung der räumlichen Variabilität

Im weiteren soll überprüft werden, inwieweit sich die räumliche Variabilität der Wassergehalte und des mineralischen Stickstoffs im Boden über den Jahresverlauf verändert. Um die Variabilität in der Fläche beurteilen zu können, wird die geostatistische Größe des Range herangezogen. Durch den Range lassen sich räumliche Beziehungen zwischen Beobachtungspaaren beschreiben. Je kleiner der Range auf einer Fläche ist, desto heterogener ist diese einzuschätzen und andersrum. Zu diesem Zweck werden die über den Untersuchungszeitraum ermittelten Reichweiten der jeweiligen Herbst- und Frühjahrsbeprobung für die Schläge *Autobahn* (Abb. 5.4) und *Finkenherd* (Abb. 9.2) grafisch aufgetragen und verglichen.



**Abb. 5.4:** Grafische Darstellung des Range für die untersuchten Tiefenzonen zu verschiedenen Messterminen auf Schlag *Autobahn*: a) volumetrischer Wassergehalt und b)  $N_{\min}$ -Gehalt

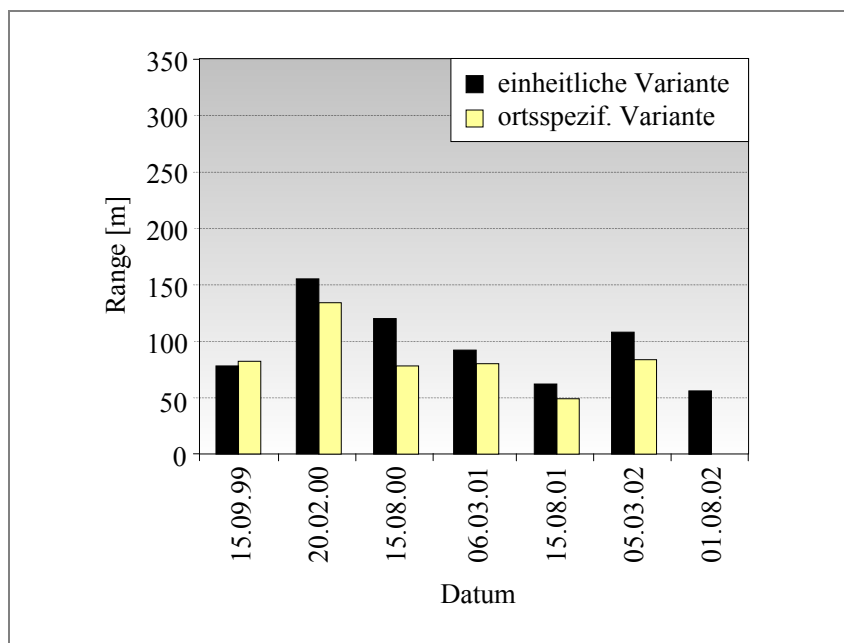
Betrachtet man die volumetrischen Wassergehalte auf Schlag *Autobahn* (Abb. 5.4, a) fällt eine deutliche Zunahme des Ranges über alle Tiefenstufen bei der Frühjahrsbeprobung auf. Während die Herbstwerte um einen Range von 68 - 170 m schwanken, weisen die Frühjahrswerte einen Range von 105 - 321 m auf. Nimmt man die Tiefenzone 6 - 9 dm, die stark durch die Dränage beeinflusst wird, aus dieser Berechnung heraus liegt der Range sogar bei 232 - 321 m.

Bei den  $N_{\min}$ -Gehalten lässt sich auf Schlag *Autobahn* kein generelles Muster beim Range erkennen (Abb. 5.4, b). Der Schwankungsbereich der einzelnen Tiefenstufen liegt zwischen 52 - 221 m. Als Maximalrange über die gesamte Tiefe wird am 22.02.00 ein Wert von 270 m ermittelt. Am 18.09.01 fällt der Range in allen Tiefenstufen auf 52 - 70 m nach vorangegangener organischer Düngung mit Hühnermist.

Bei den volumetrischen Wassergehalten werden über den Jahresverlauf Änderungen bei der räumlichen Variabilität festgestellt, die sich sehr gut anhand der unterschiedlichen Range-Weiten zwischen Herbst- und Frühjahrsbeprobung nachweisen lassen. Im Frühjahr nach Auffüllung der Wasserspeicherkapazitäten im Boden ist die Variabilität am geringsten. Über die Vegetationsperiode nimmt durch den ungleichmäßigen Wasserentzug der Pflanzen bzw. durch Evaporation die Variabilität weiter zu. Die räumliche Verteilung der volumetrischen Wassergehalte ist stark an die Bodentextur gebunden (siehe Kap. 5.2.2). Diese Aussage bestätigen die Ergebnisse für den Range auf Schlag *Finkenherd* (Abb. 9.2, a). Dieser Schlag weist bei höheren Range nur sehr geringe Texturunterschiede auf.

Die  $N_{\min}$ -Gehalte zeigen zu fast allen Messterminen auf Schlag *Finkenherd* eine Zunahme des Range mit der Tiefe (Abb. 9.2, b). Ab 2001 bestätigen dies auch die Ergebnisse auf dem Schlag *Autobahn*. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Variabilität bei den  $N_{\min}$ -Gehalten im Boden starken Schwankungen unterliegt und meist mit der Tiefe abnimmt.

Inwieweit unterschiedliche Managementmaßnahmen die Variabilität bei den  $N_{\min}$ -Gehalten beeinflussen, sollen Variantenvergleiche zwischen einheitlicher und ortsspezifischer Bewirtschaftung auf Schlag *Autobahn* klären. Auch hier wird wieder der Range für die Beurteilung der Variabilität herangezogen. Über den Untersuchungszeitraum von vier Jahren zeigen die Range-Werte der beiden Varianten kaum größere Unterschiede (Abb. 5.5).



**Abb. 5.5:** Grafische Darstellung des Range für den  $N_{\min}$ -Gehalt (0 - 9 dm) bei unterschiedlicher Bewirtschaftung auf Schlag *Autobahn* (n = 30/Variante)

Es ist ein fast paralleler Verlauf bei den Varianten zu erkennen. Die einheitlich gedüngte Variante weist über die gesamte Untersuchungsperiode einen leicht höheren (+10 m) Range als die ortsspezifische Variante auf. Die variable Düngung führt also zu einer Verringerung des Range. Ungünstige Witterungsverhältnisse, wie die Starkregen im Februar 2000 oder die Ausbringung von organischen Düngern im August 2001 zeigen ebenfalls eine sofortige Wirkung beim Range. Im ersten Fall erhöht sich der Range und die Variabilität in der Fläche sinkt, weil N-Auswaschung erfolgt. Im zweiten Fall wird bei der organischen Düngung die Variabilität in der Fläche künstlich erhöht und der Range verkleinert. Beides lässt sich gut aus Abb. 5.5 ablesen.

### 5.1.2 Statistische Auswertung der Beprobungsdaten

Die mittleren Wassergehalte schwanken auf den fünf Untersuchungsschlägen in den einzelnen Tiefenzonen (bis 9 dm) von 0.09 - 0.26 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> (Tab. 5.4).

**Tab. 5.4:** Statistische Kennwerte zum Wassergehalt bei Erstbeprobung unterteilt nach Tiefenstufen

Tiefe	Mittel	Spannweite		s	CV
[dm]	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Min	Max	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]
<b>Feldscheide-links/Thumby (n = 50), 23.08.00</b>					
0 - 3	0.202	0.150	0.286	0.025	12
3 - 6	0.158	0.071	0.269	0.037	23
6 - 9	0.166	0.093	0.283	0.031	19
0 - 9	0.175	0.109	0.279	0.027	15
<b>111-3/Kassow (n = 116), 28.10.99</b>					
0 - 3	0.235	0.185	0.309	0.023	10
3 - 6	0.150	0.076	0.242	0.031	21
6 - 9	0.162	0.058	0.241	0.033	20
0 - 9	0.182	0.120	0.256	0.023	13
<b>Kamp-Ost/Groß Twülpstedt (n = 59), 11.11.99</b>					
0 - 3	0.205	0.155	0.292	0.027	13
3 - 6	0.168	0.094	0.289	0.048	29
6 - 9	0.202	0.065	0.352	0.079	39
0 - 9	0.191	0.113	0.256	0.045	24
<b>Autobahn/Beckum (n = 60), 15.09.99</b>					
0 - 3	0.262	0.127	0.437	0.073	28
3 - 6	0.260	0.119	0.449	0.067	26
6 - 9	0.219	0.105	0.554	0.064	29
0 - 9	0.250	0.124	0.480	0.059	24
<b>Finkenherd/Wulfen (n = 51), 12.09.00</b>					
0 - 3	0.217	0.162	0.314	0.036	17
3 - 6	0.148	0.064	0.277	0.042	28
6 - 9	0.092	0.021	0.266	0.056	61
0 - 9	0.152	0.088	0.268	0.040	26

Hervorgerufen werden diese Schwankungsbreiten u.a. durch Texturunterschiede und lokale Besonderheiten. Die höchsten Wassergehalte sind auf den tonigen Böden des Schlags *Autobahn* zu finden. Tonböden besitzen nicht nur eine hohe Wasserspeicherkapazität, sondern entwässern aufgrund ihres hohen Totwasseranteils nicht so stark wie Sandböden. So trocknen die leichten Sandstandorte (Schlag *Feldscheide-links* und *111-3*) deutlich schneller aus

als Tonböden. Die hohen Wassergehalte in 6 - 9 dm Tiefe auf Schlag *Kamp-Ost* ergeben sich aus dem Grundwassereinfluss auf diesem Standort. Auf dem Schlag *Finkenherd* fällt dagegen eine deutlich Abnahme der Wassergehalte in der selben Tiefenzone auf. Diese lässt sich auf einen Substratwechsel in dieser Tiefe zurückführen. Hier steht unter Löss Kies an, der eine deutlich geringere Wasserspeicherkapazität besitzt.

Bei den Spannweiten kann man feststellen, dass diese über die Tiefe z.T. deutlich zunehmen, wie das Beispiel Schlag *Autobahn* zeigt. Dieser Schlag weist eine Spanne von  $0.36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  bei den mittleren Wassergehalten über 0 - 9 dm Tiefe auf. Aber auch in den einzelnen Tiefenzonen sind auf diesem Schlag sehr große Spannweiten von  $0.31 - 0.45 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  zu finden, die auf eine hohe Variabilität bei den Standorteigenschaften hindeuten. Die anderen Schläge weisen über den gleichen Tiefenbereich (0 - 9 dm) nur Spannweiten von  $0.14 - 0.19 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  auf. Die Schläge *Feldscheide-links* und *111-3* zeigen Variabilitätskoeffizienten von  $< 15 \%$ , die Schläge *Kamp-Ost*, *Autobahn* und *Finkenherd* CV-Werten von 24 - 26 % bei den mittleren Wassergehalten über 0 - 9 dm Tiefe. CV-Werte in dieser Größenordnung bestätigen nur eine geringe Streuung bei den Messwerten. Tendenziell ist auf allen Untersuchungsschlägen eine Zunahme der Variabilität mit der Tiefe bei den mittleren Wassergehalten zu beobachten.

Die mittleren  $N_{\min}$ -Werte der einzelnen Untersuchungsschläge zeigen zu Beginn der Probenahme ebenfalls eine sehr große Schwankungsbreite im Profil (Tab. 5.5).

**Tab. 5.5:** Statistische Kennwerte zum  $N_{\min}$ -Gehalt bei Erstbeprobung unterteilt nach Tiefenstufen

Tiefe	Mittel	Spannweite		s	CV
[dm]	[kg N/ha]	Min	Max	[kg N/ha]	[%]
Feldscheide-links/Thumby (n = 50), 23.08.00					
0 - 3	27	9	124	19	70
3 - 6	3	0	20	3	100
6 - 9	2	0	7	2	100
0 - 9	32	13	132	21	66
111-3/Kassow (n = 116), 28.10.99					
0 - 3	52	25	80	11	21
3 - 6	27	7	74	11	41
6 - 9	10	2	42	7	70
0 - 9	89	45	173	24	27
Kamp-Ost/Groß Twülpstedt (n = 59), 11.11.99					
0 - 3	63	47	95	11	17
3 - 6	30	9	54	9	30
6 - 9	10	5	22	3	30
0 - 9	102	72	142	16	16
Autobahn/Beckum (n = 60), 15.09.99					
0 - 3	113	49	210	35	31
3 - 6	49	9	101	20	41
6 - 9	12	2	62	10	83
0 - 9	175	73	321	54	31
Finkenherd/Wulfen (n = 51), 12.09.00					
0 - 3	98	38	239	42	43
3 - 6	32	3	121	26	81
6 - 9	16	3	84	18	112
0 - 9	145	78	321	58	40

Stellenweise liegen die  $N_{\min}$ -Werte im Minimum bei 13 kg N/ha und im Maximum bei 321 kg N/ha in 0 - 9 dm Tiefe. Auffällig ist dabei, dass mit zunehmender Profiltiefe die Höhe und damit verbunden auch die Schwankungsbreite der  $N_{\min}$ -Werte im Herbst abnehmen. Findet man in 0 - 3 dm Tiefe noch mittlere  $N_{\min}$ -Gehalte von 27 kg N/ha bis 113 kg N/ha, sind es in der nächst folgenden Tiefenzone (3 - 6 dm) nur noch 3 bis 49 kg N/ha und in 6 - 9 dm Tiefe 2 bis 16 kg N/ha. Besonders auf den Schlägen *Autobahn* und *Finkenherd* fallen sehr hohe mittlere  $N_{\min}$ -Gehalte nach der Ernte von > 140 kg N/ha in den oberen 9 dm auf, die zu einem Großteil aus vorangegangenen organischen Düngungen stammen.

Alle Schläge zeigen mit der Tiefe abnehmende mittlere  $N_{\min}$ -Gehalte. Findet man auf den meisten Schlägen Standardabweichungen von < 25 kg N/ha über 0 - 9 dm Tiefe, zeigen auch hier die Schläge *Autobahn* und *Finkenherd* Werte von > 50 kg N/ha. Die Standardabweichung ist auf diesen beiden Schlägen doppelt so hoch wie auf den anderen drei Untersuchungsschlägen.

Zieht man an dieser Stelle den Variationskoeffizienten für die Auswertung heran, zeigen die  $N_{\min}$ -Werte (0 - 9 dm) CV-Werte von 16 - 66 %. D.h. liegt der CV-Wert bei < 30 %, lassen die mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte auf eine geringe Streuung in der Fläche schließen, was auf die Schläge *Kamp-Ost* und *III-3* zutrifft. Höhere CV-Werte hingegen weisen auf Heterogenitäten bei der  $N_{\min}$ -Verteilung hin. Der Anstieg der Variabilität in der Vertikalen wird in der Literatur ebenfalls bei DAHIYA et al. (1984) und SPRINGOB et al. (1985) erwähnt. Der relativ hohe Variationskoeffizient in 6 - 9 dm Tiefe wird in einem sehr hohen Maße durch die steigende Messunsicherheit im Bereich der sehr niedrigen Messwerte mitbestimmt (CAMERON et al., 1971). Sie sind auch die Ursache für die höheren CV-Werte auf Schlag *Feldscheide-links* in 3 - 6 dm und 6 - 9 dm Tiefe, da hier die Werte z.T. unterhalb der Nachweisgrenze liegen.

Interessant erscheint für eine detailliertere Betrachtung der Schlag *Autobahn* zu sein. Der Schlag zeigt bei den mittleren Wasser- und  $N_{\min}$ -Gehalten die größten Spannweiten und soll im folgenden nach Bodenartenhauptgruppen unterteilt werden. Die Unterteilung der Profildaten erfolgt nach KA4 (AG BODEN, 1994) in die Bodenartenhauptgruppen Sand, Lehm und Ton. Dabei wird untersucht wie groß der Einfluss der Bodenarten auf die Variabilität bei den Parametern Wassergehalt,  $N_{\min}$  und Ertrag ist und ob sich die Variabilität durch Klassifikation in Bodenartenhauptgruppen eingrenzen lässt. Betrachtet werden jeweils die Messergebnisse der Herbstbeprobungen von 1999 bis 2002.

Über den Beprobungszeitraum grenzen sich bei den mittleren Wassergehalten die drei untersuchten Bodenartenhauptgruppen deutlich voneinander ab, wie Tab. 5.6 zeigt. Auf den Sandböden werden die niedrigsten mittleren Wassergehalte gemessen. Von Sand über Lehm zum Ton steigen die mittleren Wassergehalte im Boden (0 - 9 dm Tiefe) kontinuierlich an. Die größte Spannweite zeigen die Lehme noch vor den Tonen. Die geringsten CV-Werte werden auf den tonigen Arealen des Schlages *Autobahn* ermittelt und nehmen über die Lehme in Richtung der Sande signifikant zu. Diese Ergebnisse lassen sich auch für die Folgejahre verifizieren.



**Tab. 5.6:** Klassifikation der Wassergehalte aus der Rasterbeprobung für Schlag *Autobahn* über 0 - 9 dm Tiefe nach Bodenartenhauptgruppen zu verschiedenen Messterminen

Bodenarten- hauptgruppe	Beprobungs- termin	Mittel [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Spannweite		s [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	CV [%]	Anzahl n
			Min	Max			
			[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]				
Sand	15.09.99	0.162	0.124	0.232	0.035	22	9
Lehm	15.09.99	0.257	0.184	0.480	0.053	21	36
Ton	15.09.99	0.287	0.250	0.325	0.021	7	15
Sand	15.08.00	0.181	0.146	0.242	0.036	20	9
Lehm	15.08.00	0.285	0.198	0.366	0.038	13	36
Ton	15.08.00	0.313	0.270	0.354	0.024	8	15
Sand	18.09.01	0.228	0.178	0.305	0.042	18	9
Lehm	18.09.01	0.275	0.194	0.362	0.040	14	36
Ton	18.09.01	0.301	0.252	0.354	0.026	9	15
Sand	01.08.02	0.251	0.199	0.352	0.054	22	9
Lehm	01.08.02	0.322	0.214	0.398	0.050	16	36
Ton	01.08.02	0.359	0.303	0.404	0.036	10	15

Zur Erstbeprobung in 1999 lässt sich auf Schlag *Autobahn* ein kontinuierlicher Anstieg bei den mittleren  $N_{\min}$ -Werten von Sand über Lehm zu Ton erkennen (Tab. 5.7).

**Tab. 5.7:** Klassifikation der  $N_{\min}$ -Gehalte aus der Rasterbeprobung für Schlag *Autobahn* über 0 - 9 dm Tiefe nach Bodenartenhauptgruppen zu verschiedenen Messterminen

Bodenarten- hauptgruppe	Beprobungs- termin	Mittel [kg N/ha]	Spannweite		s [kg N/ha]	CV [%]	Anzahl n
			Min	Max			
			[kg N/ha]				
Sand	15.09.99	154	88	310	67	43	9
Lehm	15.09.99	173	73	321	55	32	36
Ton	15.09.99	190	132	310	41	21	15
Sand	15.08.00	71	51	141	29	41	9
Lehm	15.08.00	69	40	171	27	39	36
Ton	15.08.00	60	43	90	14	23	15
Sand	18.09.01	173	77	233	55	32	9
Lehm	18.09.01	160	64	428	86	54	36
Ton	18.09.01	146	87	232	44	30	15
Sand	01.08.02	51	43	73	9	18	9
Lehm	01.08.02	46	31	90	12	27	36
Ton	01.08.02	58	34	107	19	33	15

Während der mittlere  $N_{\min}$ -Wert von Sand zu Ton bei der Erstbeprobung ansteigt, fällt die Standardabweichung und der Variationskoeffizient. Die CV-Werte für die Bodenartenhauptgruppen Sand und Lehm liegen auf Schlag *Autobahn* bei 43 % bzw. 32 %, was auf Heterogenität innerhalb dieser Bodenartengruppen hindeutet. Dagegen weist der CV-Wert für die Bodenartenhauptgruppe Ton mit 21 % eine geringe Streuung auf. Das heißt, die Heterogenität der mittleren  $N_{\min}$ -Werte ist auf den sandigen Bodenarealen doppelt so groß wie auf den tonigen Böden. Die lehmigen Flächenteile zeigen ebenfalls eine um 50 % höhere Variabilität bei den  $N_{\min}$ -Werten als die Tonböden.

In 2000 fallen auf dem Schlag *Autobahn* die mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte deutlich niedriger aus als in 1999. Die mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte unterscheiden kaum zwischen den einzelnen Bodenartenhauptgruppen, trotzdem sind ähnlich hohe CV-Werte wie in 1999 zu finden. In 2001 wird die Probenahme durch die Gabe von Hühnermist beeinflusst und ist deshalb schwer

interpretierbar. Sehr auffällig ist der recht hohe CV-Wert auf dem lehmigen Flächenteil. Als Ursache werden hier Ungenauigkeiten bei der Ausbringung bzw. in der Inhomogenität des Hühnermistes angesehen. Im letzten Beprobungsjahr (2002) liegen die mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte für die untersuchten Bodenartenhauptgruppen wieder sehr eng beieinander. Die sandigen Bereiche zeigen CV-Werte von  $< 20 \%$ , was auf eine sehr geringe Streuung bei den Messwerten hindeutet. Die geringe Streuung der mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte wird auf den sandigen aber auch auf den lehmigen Arealen des Schlags *Autobahn* durch Starkregen im Juni/Juli hervorgerufen, die zu einer verstärkten N-Auswaschung aus dem untersuchten Bodenprofil bis 9 dm Tiefe führten.

Beim Ertrag liegen die mittleren Erträge der drei Bodenartenhauptgruppen sehr eng beieinander (Tab 5.8). Generell sind keine Zusammenhänge zwischen Ertragsbildung und Bodenartenhauptgruppen auf Schlag *Autobahn* zu erkennen. Der Grund dafür ist, dass die Ertragsbildung auf diesem Schlag durch Niederschlag, Düngung, Schädlingsbefall u.a. stärker beeinflusst wird als durch die Bodenverhältnisse.

**Tab. 5.8:** Klassifikation der Erträge für Schlag *Autobahn* nach Bodenartenhauptgruppen zu verschiedenen Messterminen

Bodenarten- hauptgruppe	Beprobungs- termin	Mittel [t TM/ha]	Spannweite		s [t TM/ha]	CV [%]	Anzahl n
			Min	Max			
			[t TM/ha]	[t TM/ha]			
Sand	15.09.99	4.0	3.7	4.5	0.2	6	9
Lehm	15.09.99	4.0	3.6	4.6	0.2	6	36
Ton	15.09.99	3.9	3.6	4.2	0.2	4	15
Sand	15.08.00	6.5	4.9	7.8	1.0	15	9
Lehm	15.08.00	7.2	5.2	8.2	0.7	10	36
Ton	15.08.00	7.0	5.6	7.8	0.7	10	15
Sand	18.09.01	5.9	3.9	7.3	1.3	23	9
Lehm	18.09.01	7.3	5.8	8.4	0.7	9	36
Ton	18.09.01	7.3	6.7	7.8	0.3	4	15
Sand	01.08.02	6.0	4.6	6.8	0.7	12	9
Lehm	01.08.02	5.9	4.4	6.9	0.7	12	36
Ton	01.08.02	6.0	4.5	7.4	0.7	12	15

Als Fazit bleibt anzumerken, dass eine Klassifikation nach Bodenartenhauptgruppen durchaus sinnvoll sein kann, wenn sie hilft die räumliche Variabilität von Teilflächen weiter zu verringern. Für die Beurteilung der mineralischen Stickstoffgehalte im Boden scheint dagegen die Klassifizierung nach Bodenartenhauptgruppen nicht ratsam. Anzumerken bleibt, dass die für Schlag *Autobahn* getroffenen Aussagen Einzelergebnisse sind und nicht ohne weiteres auf andere Schläge übertragen werden können.

Um die kleinräumige Variabilität innerhalb von Teilflächen noch genauer zu bestimmen, wird die Probenahmedichte weiter erhöht. Zu diesem Zweck werden auf Schlag *Autobahn* zwei Nester (à 16 Einstiche) mit einer Rasterweite von 5 x 5 m angelegt. Beide Nester sind der Bodenartgruppe Sand zuzuordnen.

Die Nester zeigen im Mittel nur geringe Unterschiede bei den Wassergehalten (Tab. 5.9). In allen vier Untersuchungsjahren werden im Nest 2 leicht höhere mittlere Wassergehalte gemessen als im Nest 1. Die Differenzen zwischen beiden Nestern betragen zwischen  $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  und  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Ebenfalls weist Nest 2 in allen vier Jahren eine deutlich höhere Spannweite bei den mittleren Wassergehalten auf. Die sehr niedrigen Variationskoeffizienten der Nester (4 - 12 %) bestätigen, dass im 5 x 5 m Bereich bei den Wasserge-

halten auf Schlag *Autobahn* homogene Strukturen zu finden sind. Der Vergleich der Nester mit der Bodenartenhauptgruppe Sand zeigt nur in 1999 und 2000 deutliche Abweichungen bei den mittleren Wassergehalten. Die Standardabweichung ist auf dem Sand z.T. doppelt so groß als in den Nestern. Die CV-Werte sind dementsprechend größer (18 - 22 %).

**Tab. 5.9:** Wassergehalte der Nester und der Bodenartenhauptgruppe Sand nach der Rasterbeprobung für Schlag *Autobahn* über 0 - 9 dm Tiefe zu verschiedenen Messterminen

Bezeichnung	Rasterweite [m]	Beprobungs- termin	Mittel [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Spannweite		s [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	CV [%]	Anzahl n
				Min	Max			
Nest 1	5	15.09.99	0.217	0.178	0.243	0.017	8	16
Nest 2	5	15.09.99	0.227	0.184	0.258	0.018	8	16
Sand	50	15.09.99	0.162	0.124	0.232	0.035	22	9
Nest 1	5	15.08.00	0.206	0.188	0.240	0.016	8	16
Nest 2	5	15.08.00	0.255	0.205	0.295	0.023	9	16
Sand	50	15.08.00	0.181	0.146	0.242	0.036	20	9
Nest 1	5	18.09.01	0.230	0.215	0.250	0.010	4	16
Nest 2	5	18.09.01	0.262	0.214	0.335	0.031	12	16
Sand	50	18.09.01	0.228	0.178	0.305	0.042	18	9
Nest 1	5	01.08.02	0.255	0.235	0.276	0.012	5	16
Nest 2	5	01.08.02	0.275	0.232	0.311	0.022	8	16
Sand	50	01.08.02	0.251	0.199	0.352	0.054	22	9

Die Ergebnisse der Nesterbeprobung und der Bodenartenhauptgruppe Sand zeigen über den Untersuchungszeitraum (1999 bis 2002) ohne Berücksichtigung von 2001 eine deutliche Abnahme der N<sub>min</sub>-Gehalte von 138 kg N/ha für Nest 1, von 133 kg N/ha für Nest 2 und von 103 kg N/ha bei Sand (Tab. 5.10). Die mittleren N<sub>min</sub>-Gehalte der Nester variieren zwischen Nest 1 und Nest 2 um weniger als 20 kg N/ha (ohne Einbeziehung von 2001).

**Tab. 5.10:** N<sub>min</sub>-Gehalte der Nester und der Bodenartenhauptgruppe Sand nach der Rasterbeprobung für Schlag *Autobahn* über 0 - 9 dm Tiefe zu verschiedenen Messterminen

Bezeichnung	Rasterweite [m]	Beprobungs- termin	Mittel [kg N/ha]	Spannweite		s [kg N/ha]	CV [%]	Anzahl n
				Min	Max			
Nest 1	5	15.09.99	187	118	244	35	19	16
Nest 2	5	15.09.99	167	114	213	28	17	16
Sand	50	15.09.99	154	88	310	67	43	9
Nest 1	5	15.08.00	71	45	99	14	20	16
Nest 2	5	15.08.00	81	65	108	11	14	16
Sand	50	15.08.00	71	51	141	29	41	9
Nest 1	5	18.09.01	138	48	283	52	38	16
Nest 2	5	18.09.01	113	62	234	42	37	16
Sand	50	18.09.01	173	77	233	55	32	9
Nest 1	5	01.08.02	49	30	72	11	22	16
Nest 2	5	01.08.02	34	20	51	8	24	16
Sand	50	01.08.02	51	43	73	9	18	9

Außer in 2001 zeigen die Variationskoeffizienten der Nester Werte von 14 - 24 %, die auf eine homogene N<sub>min</sub>-Verteilung hinweisen. Im Gegensatz dazu ist bei der Bodenartenhauptgruppe Sand zu Probenahmebeginn ein deutlich höherer CV-Wert (43 %) zu finden, der in

den Folgejahren deutlich absinkt. In 1999 und 2000 ist der CV-Wert der Bodenartenhauptgruppe Sand noch doppelt so hoch als in den beiden Nestern, nähert sich aber in 2001 und 2002 dem CV-Wert der Nester an. Die Ursachen dafür scheinen im Düngungsmanagement wie auch in den klimatischen Witterungsereignissen (Starkregen im Juni/Juli 2002) zu liegen.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine erhöhte Beprobungsdichte die räumliche Variabilität auf Schlag *Autobahn* bei den Wassergehalten um  $\sim 50\%$  verringert werden kann. Für die  $N_{\min}$ -Gehalte gilt die Aussage nicht. Hier zeigen die Ergebnisse von 2001 und 2002, dass die räumliche Variabilität der  $N_{\min}$ -Gehalte im  $5 \times 5$  m Bereich sogar größer ist als die der Teilfläche Sand. Die Bedeutung der Heterogenität auf kleinsten Raum muss deswegen differenziert beurteilt werden. Bei der Nährstoffaufnahme durch die Pflanze spielt die kleinräumliche Variabilität eher eine untergeordnete Rolle, da das Wurzelsystem die Variabilität zu einem gewissen Teil ausgleichen kann (STENGER et al., 1992). Bei mikrobiologischen Transformationsprozessen (z.B. Denitrifikation) hingegen stellt die Nichtbeachtung eine potentielle Fehlerquelle dar.

### Kleinräumige Variabilität über die Tiefe

Um die Tiefenverlagerung von Stickstoff mit zu erfassen, wurden Nester angelegt und bis 30 dm Tiefe beprobt. In Tab. 5.11 werden die  $N_{\min}$ -Gehalte für die Nester der Schläge *Autobahn* und *Feldscheide-links* zu verschiedenen Messterminen gegenübergestellt.

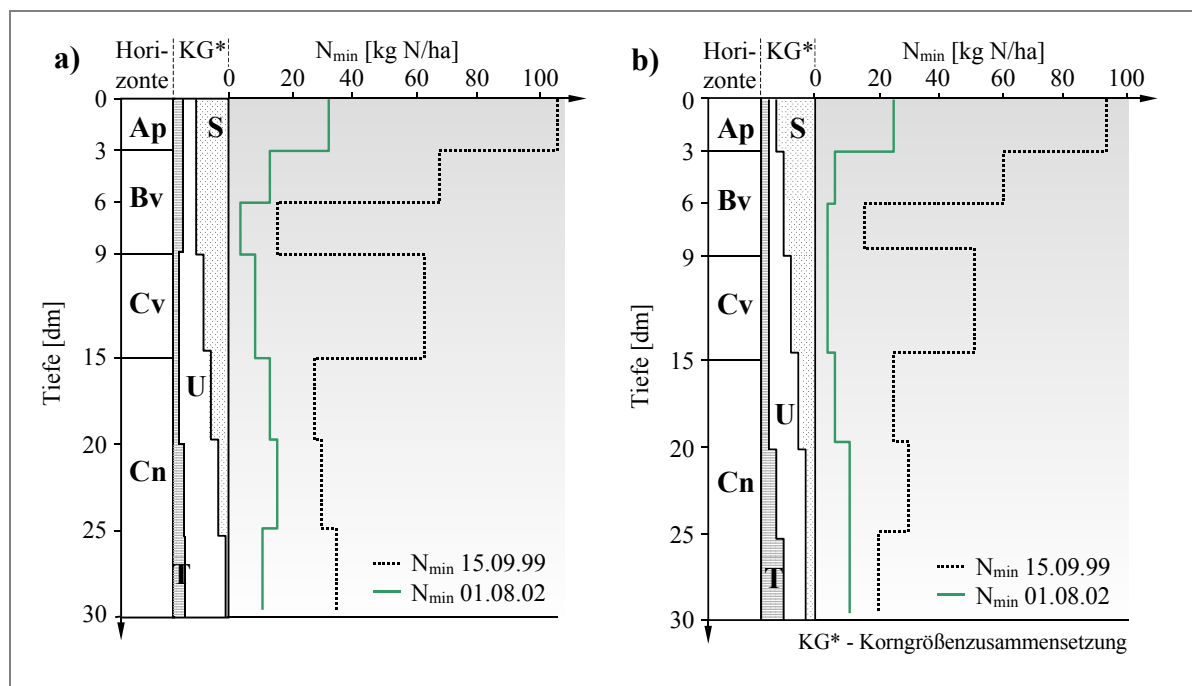
**Tab. 5.11:** Statistische Kennwerte der  $N_{\min}$ -Gehalte für die Nester der Schläge *Autobahn* und *Feldscheide-links* zu verschiedenen Messterminen

Schlag- kürzel	Beprobungs- termin	Raster- weite [m]	Tiefe	Mittel	Spannweite		s	CV
			[dm]	[kg N/ha]	Min	Max	[kg N/ha]	[%]
Nest 1 (n = 16)								
Bec	15.09.99	5 x 5	0 - 30	342	272	492	63	18
Bec	23.10.01	5 x 5	0 - 30	207	148	272	40	19
Bec	01.08.02	5 x 5	0 - 30	100	71	129	17	17
Nest 2 (n = 16)								
Bec	15.09.99	5 x 5	0 - 30	290	191	441	56	19
Bec	23.10.01	5 x 5	0 - 20	149	98	187	36	24
Bec	01.08.02	5 x 5	0 - 30	66	50	89	12	19
Nest 1 (n = 16)								
Thy	23.08.00	6 x 6	0 - 30	90	51	182	33	37
Thy	06.08.02	6 x 6	0 - 30	107	76	146	23	22
Nest 2 (n = 16)								
Thy	23.08.00	6 x 6	0 - 30	88	39	183	47	53
Thy	06.08.02	6 x 6	0 - 30	104	66	136	23	22
Nest 3 (n = 16)								
Thy	23.08.00	6 x 6	0 - 30	72	23	177	45	62
Thy	06.08.02	6 x 6	0 - 30	96	56	177	35	36
Nest 4 (n = 16)								
Thy	23.08.00	6 x 6	0 - 30	49	25	89	18	36
Thy	06.08.02	6 x 6	0 - 30	91	66	155	23	25

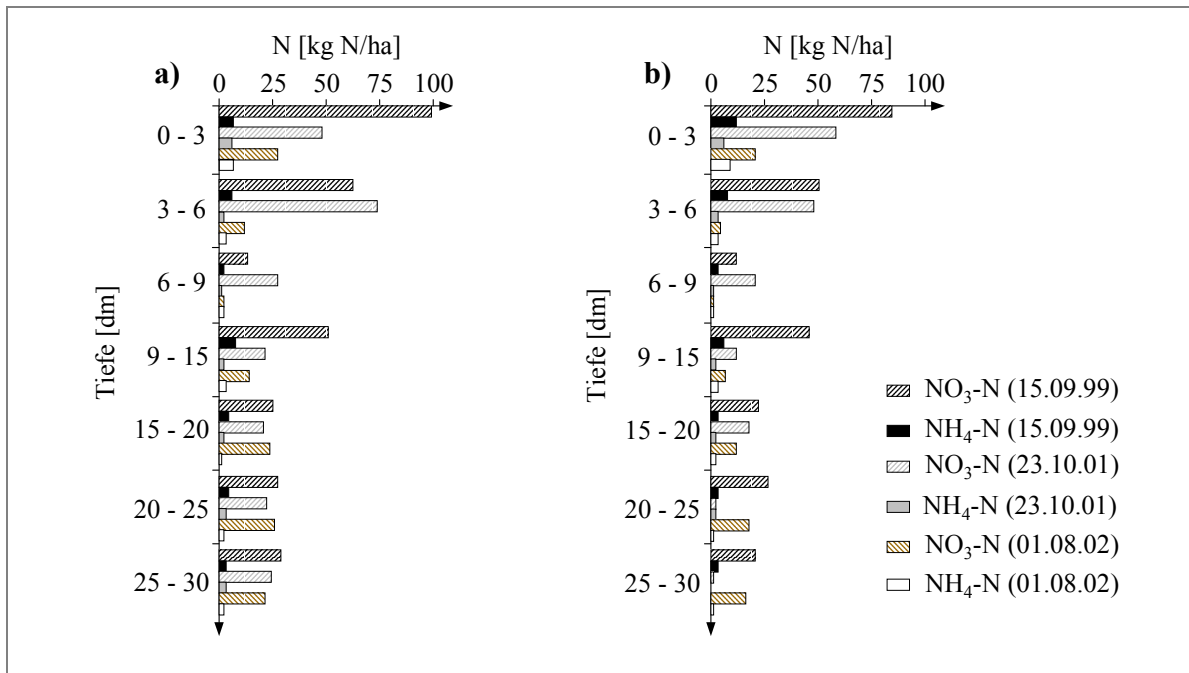
Die Messwerte auf Schlag *Autobahn* zeigen in den Nestern eine Reduzierung des mittleren mineralischen Stickstoffs im Boden zwischen September 1999 und August 2002 um mehr als 70 %. In beiden Nestern werden ebenfalls die Spannweiten der mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte, wie auch der Maximalwert um mehr als 75 % abgesenkt. Die Variationskoeffizienten der Nester liegen zwischen 18 - 24 % und bleiben über den Untersuchungszeitraum nahezu konstant. CV-Werte von < 25 % lassen auf eine homogene Bodenstruktur schließen.

Auf Schlag *Feldscheide-links* zeigen die gemessenen Werte in allen vier Nestern eine Zunahme des mineralischen Stickstoffgehaltes vom Beginn (23.08.00) zum Ende (06.08.02) des Messzyklusses von 16 - 42 kg N/ha über die Profiltiefe von 30 dm. Die mittleren  $N_{\min}$ -Werte lagen zu Beginn der Messung bei 49 bis 90 kg N/ha über 30 dm Tiefe und wurden als gering eingeschätzt. Trotz der leicht höheren mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte sinkt in den Nestern 1, 2 und 3 die Spannweite und damit verbunden auch die Standardabweichung zum Mittelwert um 22 bis 51 %. Über den Messzeitraum sinken die Variationskoeffizienten der Nester auf der einheitlich wie auch auf der ortsspezifisch gedüngten Variante deutlich. Während zu Probenahmebeginn CV-Werte beim  $N_{\min}$  von 36 - 62 % für die Nester ermittelt wurden, lagen die CV-Werte zum Ende bei 22 - 36 %. Die einheitlich gedüngte Variante (Nest 1 und 2) zeigt CV-Werte beim  $N_{\min}$  von 22 %, die auf eine homogene Verteilung des mineralischen Stickstoffs (bei einem Rasterabstand von 6 x 6 m) hindeuten. Der ortsspezifisch gedüngte Flächenteil zeigt im Nest 3 einen CV-Wert der deutlich über 25 % liegt und auf eine höhere Heterogenität im Nest hinweist. In Nest 4 liegt der Variationskoeffizient bei 25 %. Die mittleren  $N_{\min}$ -Werte steigen in diesem Nest gegenüber der Messung von 2000 um fast das doppelte an, liegen im Vergleich mit den anderen drei Nestern aber unter dem Mittel von 2002. Die applizierten Düngermengen waren in 2001 und 2002 in allen vier Nestern gleich hoch.

Abb. 5.6 zeigt die vertikale  $N_{\min}$ -Verteilung in den Nestern zu Beginn und Ende der Probenahme über 30 dm Tiefe auf Schlag *Autobahn*. Die Herbstwerte vom 15.09.99 zeigen große Überhänge an mineralischem Stickstoff in den oberen 0 - 6 dm Tiefe. So findet man im Ap-Horizont von Nest 1 (Abb. 5.6, a) im Mittel 108 kg N/ha und in 3 - 6 dm Tiefe immerhin noch 68 kg N/ha. Gut 80 % des mineralischen Stickstoffs entfällt auf Nitrat (Abb. 5.7, a).



**Abb. 5.6:** Darstellung der  $N_{\min}$ -Verteilung über die Tiefe zu verschiedenen Messterminen auf Schlag *Autobahn*: a) Nest 1, b) Nest 2

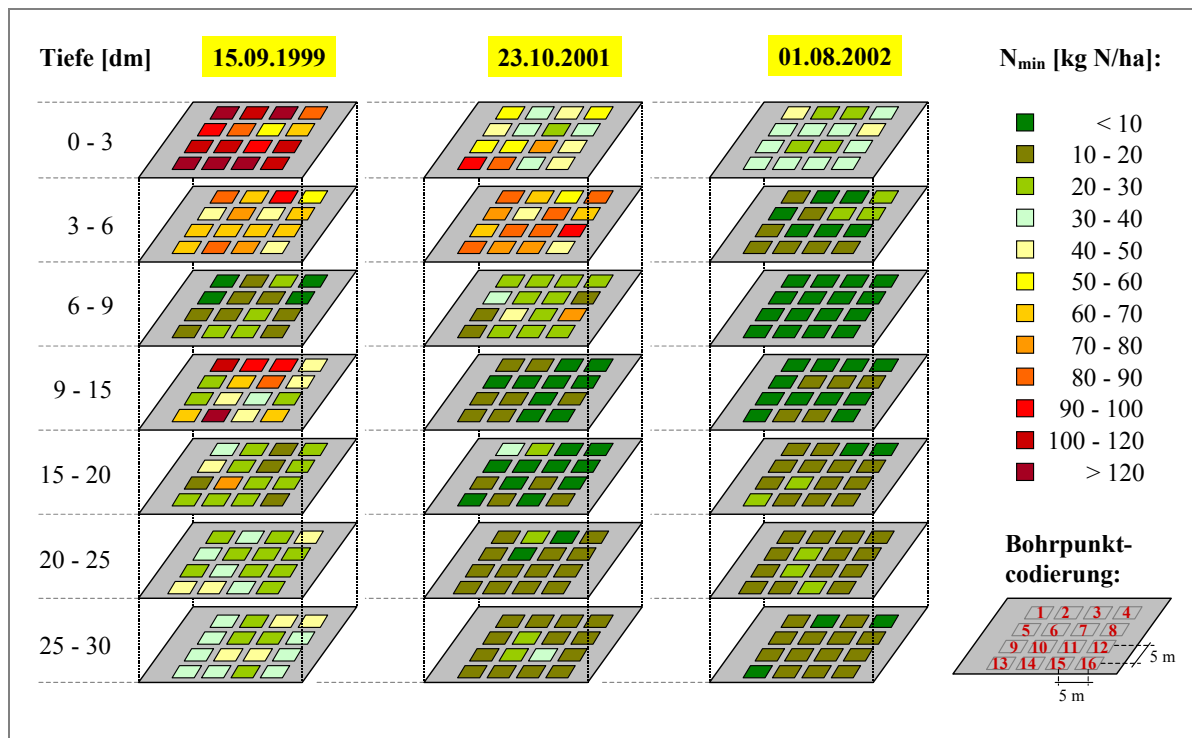


**Abb. 5.7:** Darstellung der Nitrat- und Ammonium-Verteilung über die Tiefe zu verschiedenen Messterminen auf Schlag *Autobahn*: a) Nest 1, b) Nest 2

Gerade in sandigen Oberböden sind hohe Mineralisationsraten zu erwarten, die über Winter leicht ausgewaschen werden. In der Tiefenzone 6 - 9 dm findet man im Herbst 1999 nur geringe mittlere  $N_{\min}$ -Gehalte von 20 kg N/ha. Interessant ist der sprunghafte Anstieg der  $N_{\min}$ -Werte in 9 - 15 dm. Für die hohen  $N_{\min}$ -Werte sind Nitratverlagerungsprozesse (Abb. 5.7, a) verantwortlich. Ab 15 dm Tiefe steht hier Kalkmergel an, der stauend wirkt. In 2002 pendeln sich die  $N_{\min}$ -Residuen im Nest 1 nach der Ernte ab 3 dm Tiefe bei < 20 kg N/ha ein. Das sind die zeitlich versetzten Auswirkungen der veränderten Düngungsstrategie. Diese Ergebnisse werden durch das zweite beprobte Nest in gleicher Form bestätigt (Abb. 5.6, b; Abb. 5.7, b).

Ein anderes Bild zeigen die vier Nester auf Schlag *Feldscheide-links*. Die  $N_{\min}$ -Werte zu Beginn der Messung sind deutlich kleiner als auf Schlag *Autobahn*. Unterschiede sind nur im Tiefenbereich 0 - 9 dm zu beobachten (Abb. 9.3). Im Ap-Horizont kommt es in 3 von 4 Nestern zu einer Reduzierung der  $N_{\min}$ -Werte, in den nachfolgenden Tiefenzonen bis 15 dm jedoch zu einem Anstieg gegenüber den Messungen von 2000. Durch die hohen Niederschlagsmengen im Juli 2002 mit 181 mm (langjähriges Mittel: 52 mm) ist es hier zu einer Nitratverlagerung in den letzten Wochen vor der Ernte gekommen. Im Nest 2, das höhere Schluffanteile im Bereich von 9 - 20 dm Tiefe aufweist, ist die Verlagerung hingegen nur bis 9 dm Tiefe nachweisbar (Abb. 9.3, b).

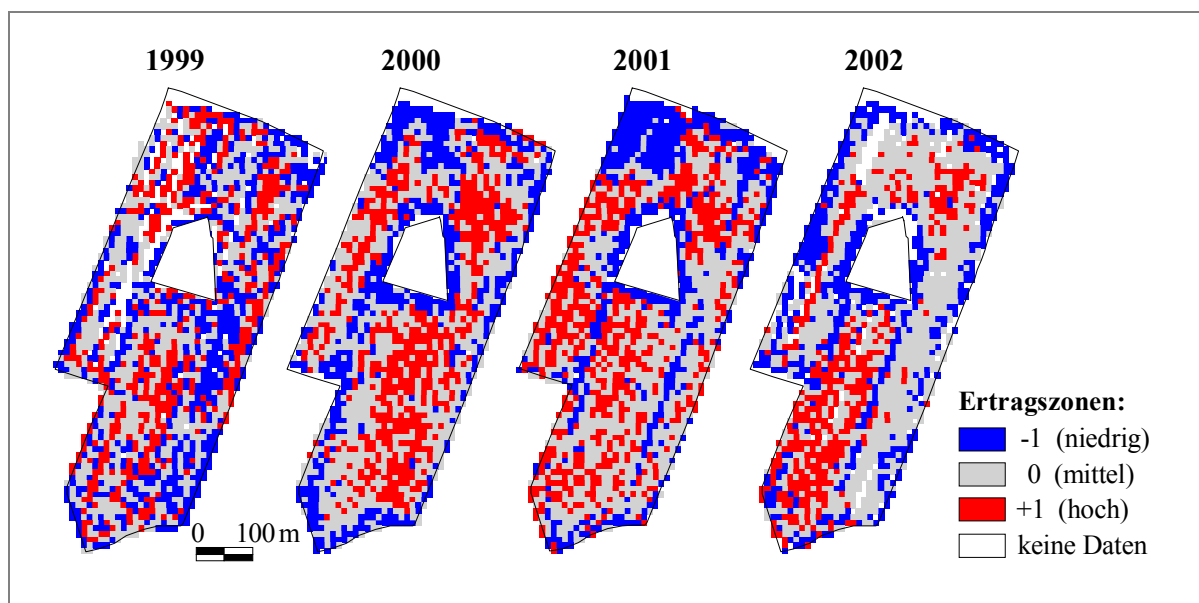
In Abb. 5.8 (Nest 1) und Abb. 9.4 (Nest 2) sind die räumlichen Muster der  $N_{\min}$ -Gehalte der Nester von Schlag *Autobahn* für die einzelnen Tiefenstufen zu den drei Messterminen für jeden Bohrpunkt dargestellt. Die einzelnen Tiefenstufen zeigen zwischen 1999 und 2002 deutlich sinkende  $N_{\min}$ -Gehalte. Eine Harmonisierung der  $N_{\min}$ -Werte ist in 2001 ab 9 dm Tiefe und in 2002 schon ab 6 dm Tiefe zu erkennen. Auf Schlag *Feldscheide-links* zeigen die räumlichen Muster des mineralischen Stickstoffs zu Messbeginn ab 9 dm Tiefe ein sehr homogenes Bild bei der Beprobung auf 6 x 6 m. Größere Schwankungsbreiten sind nur in den obersten 3 dm zu finden. In 2002 führt die Nitratverlagerung nach großen Niederschlagsereignissen zu einer Abnahme der Schwankungsbreite in den obersten 3 dm und zu einer Zunahme im Tiefenbereich 3 - 9 dm.



**Abb. 5.8:** Darstellung der  $N_{\min}$ -Tiefenverteilung zu verschiedenen Messterminen im Nest 1 auf Schlag *Autobahn*

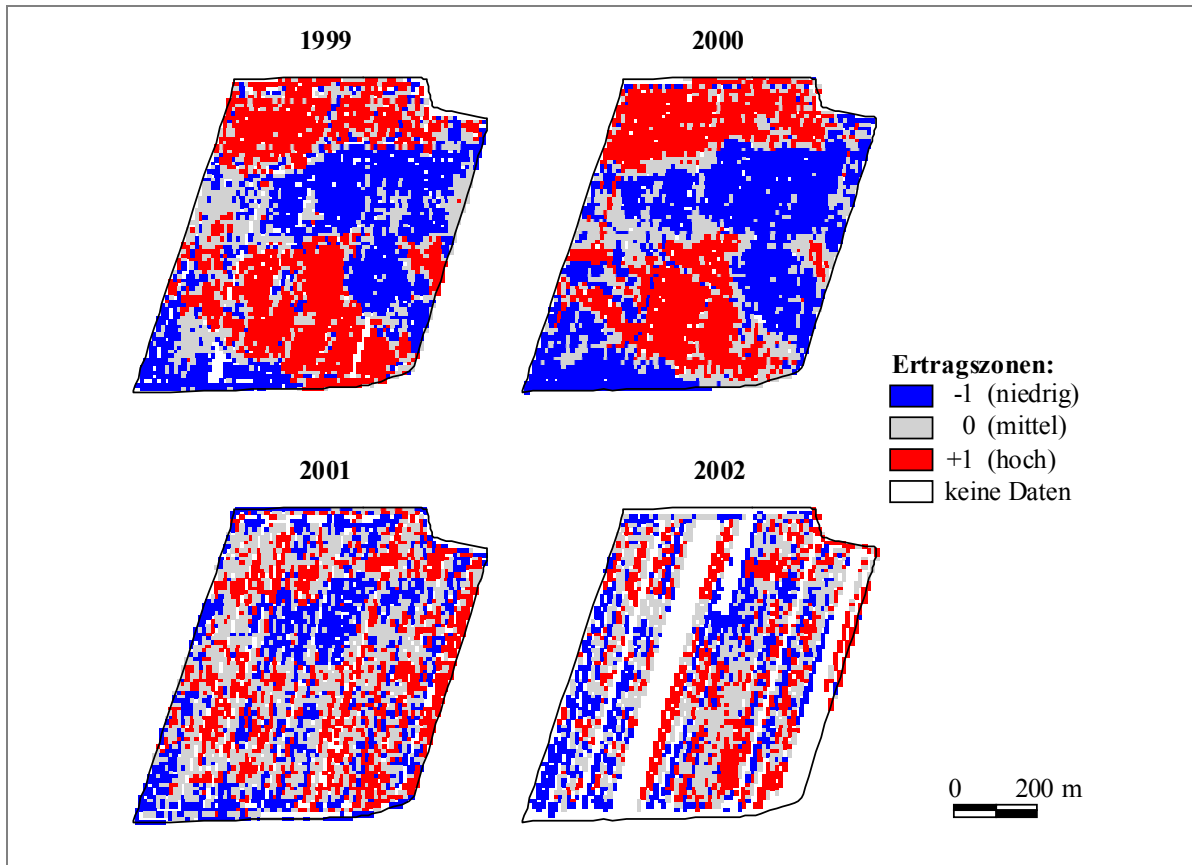
### 5.1.3 Auswertung der Ertragskarten

Die Auswertung der Erträge erfolgte anhand der zur Verfügung stehenden Ertragskarten von 1999 bis 2002 für die fünf Untersuchungsschläge. Um die unterschiedlichen Fruchtarten miteinander vergleichen zu können, werden alle Ertragsdaten auf relative Erträge (siehe Kap. 4.3.6) umgerechnet. In Abb. 5.9 werden beispielhaft für Schlag *Autobahn* die Ertragszonen der einzelnen Ertragskarten grafisch dargestellt.



**Abb. 5.9:** Zonierung der Ertragskarten von 1999 bis 2002 für Schlag *Autobahn*, Rastergröße: 10 m

Auf den ersten Blick zeigen die erstellten Ertragszonen für diesen Schlag ein sehr diffuses Bild. Gut erkennbar ist eine ertragsschwache Zone rund um das Waldgebiet in der Schlagmitte sowie eine in abgeschwächter Form immer wiederkehrende Zone mit relativ niedrigen Erträgen am nördlichen Feldrand. Diese Zone zeichnet besonders in den Jahren 2000 und 2001 durch. Areale mit relativ hohen Erträgen scheinen dagegen häufig zu wechseln. Ähnliche Feststellungen können auch für die zonierte Ertragskarten der Schläge *Feldscheidelinks* (Abb. 9.5), *111-3* (Abb. 9.6) und *Kamp-Ost* (Abb. 9.7) getroffen werden. Eine Ausnahme stellt bei diesem Vergleich lediglich der Schlag *Finkenherd* dar, der über den Untersuchungszeitraum sehr konstante Ertragszonen ausweist (Abb. 5.10).

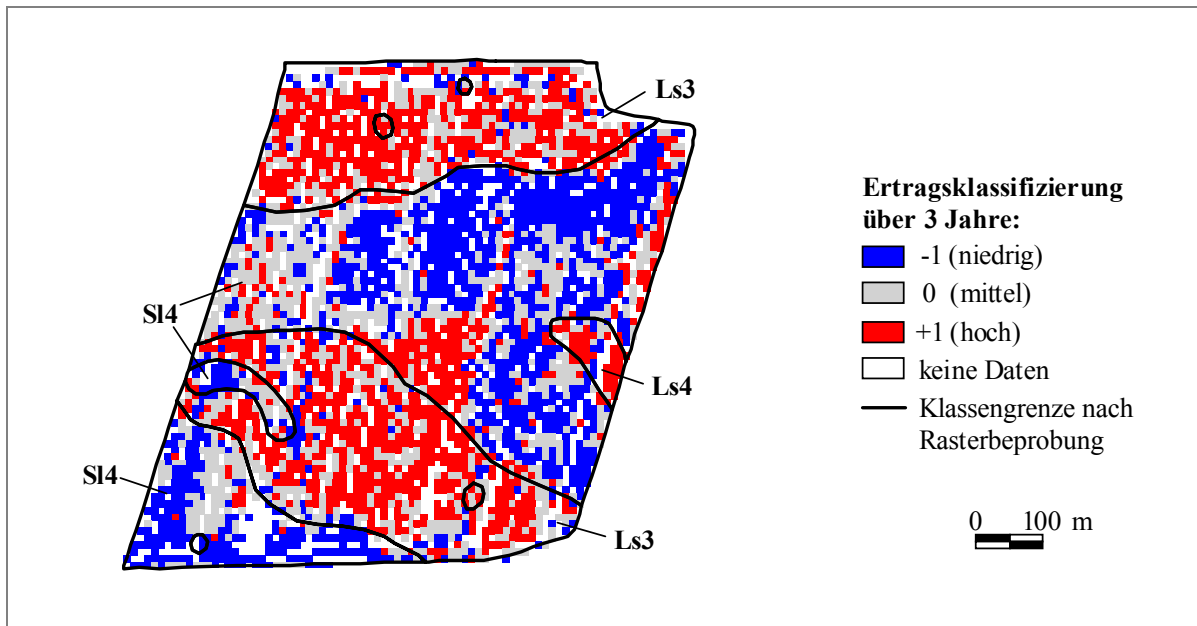


**Abb. 5.10:** Zonierung der Ertragskarten von 1999 bis 2002 für Schlag *Finkenherd*, Rastergröße: 10 m

Betrachtet man die räumliche Verteilung der Ertragszonen, fallen neben zufälligen, immer wiederkehrende Ertragsmuster auf, die z.T. durch Bodeneigenschaften (z.B. Textur) beeinflusst werden. Bestimmte Zonierungsgrenzen lassen sich durch Substratwechsel erklären, wie das Beispiel Schlag *Finkenherd* zeigt (Abb. 5.11).

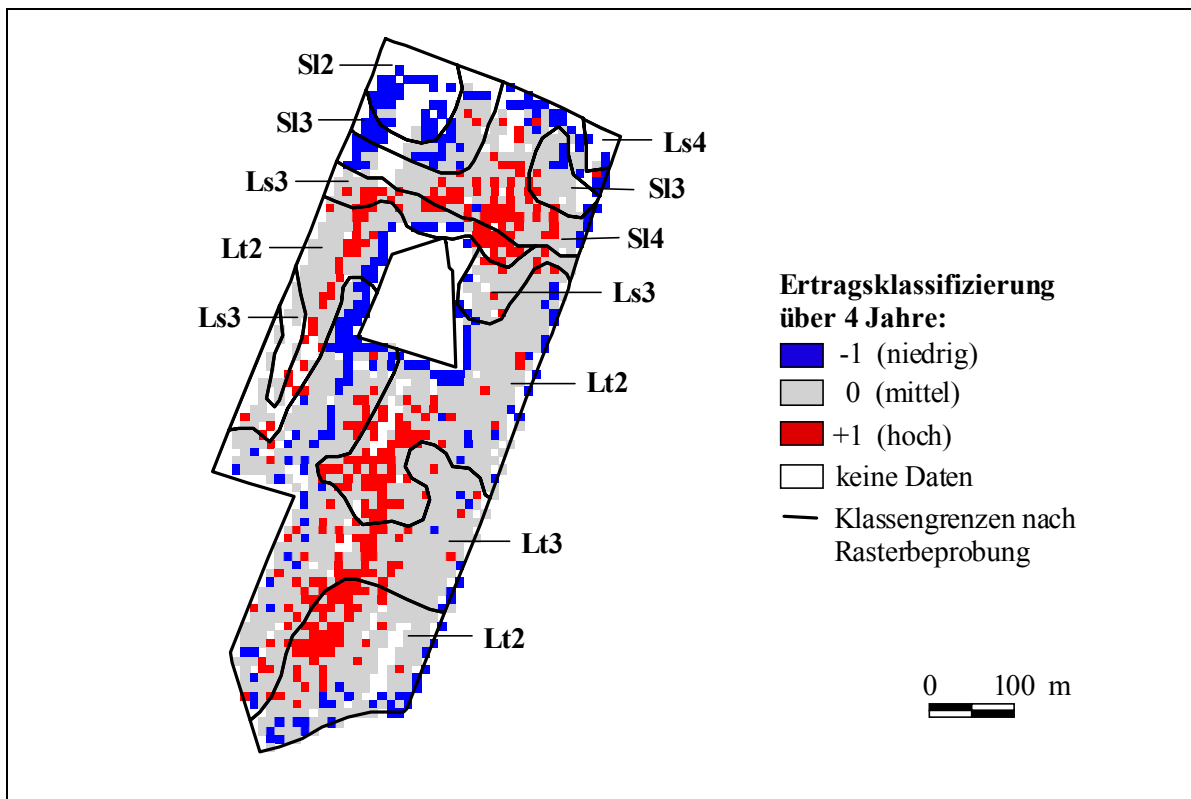
Gerade in Gebieten mit einer nur leicht positiven klimatischen Wasserbilanz wie Wulfen (siehe Kap. 4.1.3), zeichnen Texturunterschiede gut über das Ertragsbild. So ist es nicht verwunderlich, dass die Hohertragszonen in den Bereichen mit den höchsten Tongehalten (17 - 21 %) zu finden sind. Die Ertragszonen sind auf Schlag *Finkenherd* sehr stabil und variieren kaum, wie die Ertragskarten von 1999, 2000 und 2001 zeigen. So führt Wassermangel während der Vegetationsperiode zu einer erhöhten Stabilität bei den Ertragszonen, da die Wasserversorgung auf diesem Standort der limitierende Wachstumsfaktor ist.





**Abb. 5.11:** Ertragsklassifizierung (basierend auf den Ertragszonen von 1999 bis 2001) für Schlag *Finkenherd* mit Klassengrenzen der Bodenarten aus der Rasterkartierung, Rastergröße: 10 m

Teilweise werden aber auch unterschiedliche Ertragszonen durch verdichtete Bodenareale (z.B. Vorgewende) überlagert, wie das an den Randbereichen von Schlag *Autobahn* zu beobachten ist (Abb. 5.12).

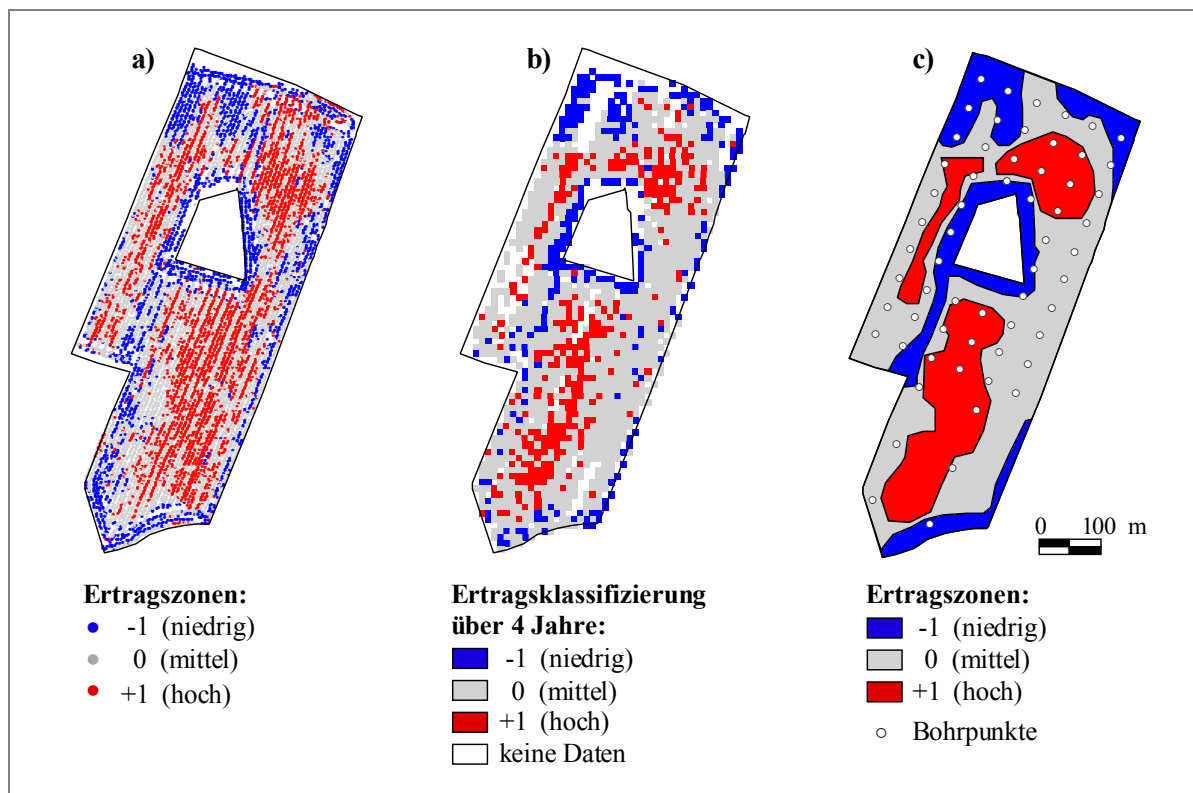


**Abb. 5.12:** Ertragsklassifizierung (basierend auf den Ertragszonen von 1999 bis 2002) für Schlag *Autobahn* mit Klassengrenzen der Bodenarten aus der Rasterkartierung, Rastergröße: 10 m

Der ertragsschwache Ring um das mittig gelegene Waldgebiet resultiert daraus, dass die Getreidepflanzen hier in Konkurrenz zu den Bäumen um Wasser, Nährstoffe und Licht stehen. Hinzu kommt, dass die Waldfläche durch ihre Lage und Form die Ertragskartierung selbst behindert. So kann z.T. nicht die volle Mähbreite genutzt werden, Keile entstehen und es muss öfter abgesetzt werden. Das begünstigt die Entstehung von scheinbaren Niedrigertragszonen. Wie die Niedrigertragszonen treten auch die Hohertragszonen auf diesem Schlag sehr komplex und zusammenhängend auf.

Im Anhang sind die Ergebnisse der Ertragszonierung für die Schläge *Feldscheide-links* (Abb. 9.8) und *Kamp-Ost* (Abb. 9.9) dargestellt. Für diese beiden Schläge gilt, dass speziell die Hohertragszonen sehr kleinräumig zersplittert auftreten. Die Niedrigertragszonen beziehen sich sehr oft auf verdichtete Schlagränder und sind selten im Schlaginneren zu finden.

In den Fällen wo Ertragsmuster auf Bodeneigenschaften zurückzuführen sind, kann die abgeleitete Zonierung (Abb. 5.13, a-c) zur Identifizierung von Managementzonen genutzt werden, um danach den Düngereinsatz für die Grundnährstoffe (P, K, Mg) oder die Bearbeitung zu steuern.



**Abb. 5.13:** Arbeitsschritte zur Identifizierung von Ertragszonen – dargestellt am Beispiel vom Schlag *Autobahn*: a) Verteilung der Ertragszonen (Ertragskarte 2000), b) Ertragsklassifizierung nach Auswertung der Ertragszonen von 1999 bis 2002 und c) abgeleitete Grenzen der Ertragszonen aus Abbildung b

## 5.2 Sensitivitätsanalyse zum Modell HERMES

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse soll im folgenden untersucht werden, wie empfindlich das Modell HERMES auf Veränderungen einzelner Parameter und Eingabegrößen reagiert. Dabei variieren einzelne Eingabegrößen über einen bestimmten realistischen Bereich unter Konstanzhaltung der anderen Parameter. Das Verfahren soll aufzeigen unter welchen Bedingungen die Aussagekraft des Modells eingeschränkt wird.

Zu diesem Zweck wird ein Standarddaten- und Parametersatz angelegt (Abb. 5.14). Die Sensitivitätsanalyse wird für einen Zeitraum mit bzw. ohne Pflanzenaufwuchs durchgeführt. Dabei wird auf reale Wetterdaten der *preagro*-Station Beckum zurückgegriffen.

Simulationszeiträume:	01.09.00 bis 01.04.01 ohne Pflanzenaufwuchs, 01.09.00 bis 01.08.01 mit Pflanzenaufwuchs (Wintergerste)
Wetterdaten:	<i>preagro</i> -Station 911 in Beckum
Anfangswassergehalt:	20 % unter $\Theta_{FK}$
Bodenart:	schwach toniger Lehm (Lt2, $\Theta_{FK} = 0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )
$C_{org}$ :	1.4 %
$D_v$ :	5 cm
$N_{min}$ -Verteilung (01.09.00):	50 kg N/ha in 0 - 9 dm
in 0 - 3 dm:	25 kg N/ha
in 3-6 dm:	15 kg N/ha
in 6-9 dm:	10 kg N/ha

**Abb. 5.14:** Standarddatensatz für die Sensitivitätsanalyse

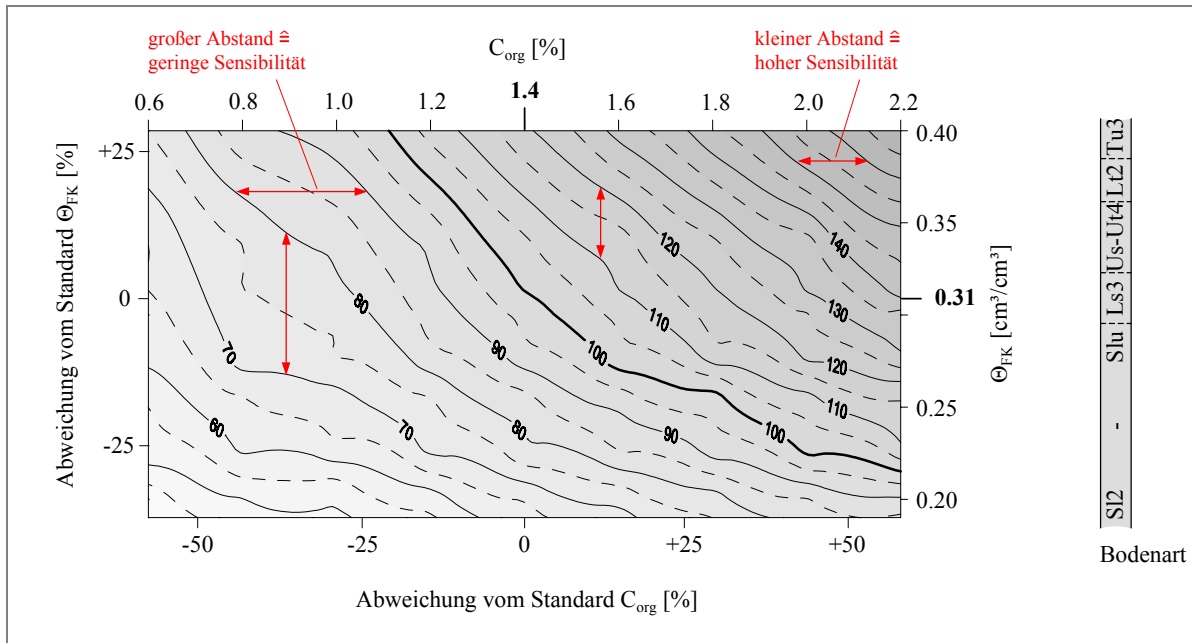
### 5.2.1 Simulation über das Winterhalbjahr

Als Maß für die Sensibilität wird die prozentuale Veränderung der berechneten  $N_{min}$ -Werte zum 01.04.01 gegenüber dem als Standardgröße erzielten Ergebnis (51 kg N/ha/9 dm) herangezogen. Dabei werden folgende Parameter variiert:

<u>Bodendaten:</u>	<u>Spannweite:</u>
$C_{org}$	0.6 - 2.2 %
$N_{min}$ (Anfangsgehalt)	20 - 80 kg N/ha/9 dm
$\Theta_{FK}$ (über Änderung der Bodenart)	0.19 - 0.40 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$
Niederschlag (Standard = 390 mm über Winter)	195 - 585 mm
Niederschlag (Standard = 700 mm, ganzjährig)	200 - 1190 mm

### Einfluss der Gehalte des organischen Kohlenstoffs ( $C_{org}$ )

Abb. 5.15 zeigt die prozentuale Veränderung des  $N_{min}$ -Wertes gegenüber dem Standardgehalt (51 kg N/ha/9 dm) in Form von Isolinien (in 5 % Abstufungen vom Standard- $N_{min}$ -Wert) bei gleichzeitiger Änderung von  $C_{org}$ -Gehalt und Bodenart. Die vertikalen bzw. die horizontalen Abstände der Isolinien zeigen, wie sensibel das Modell auf Änderungen der  $\Theta_{FK}$  bzw. des  $C_{org}$ -Wertes bei einem bestimmten  $C_{org}$ -Gehalt bzw. einem bestimmten  $\Theta_{FK}$  reagiert. Aus der Neigung der Linien kann das Verhältnis der Einflüsse beider Größen auf den  $N_{min}$ -Wert bestimmt werden.

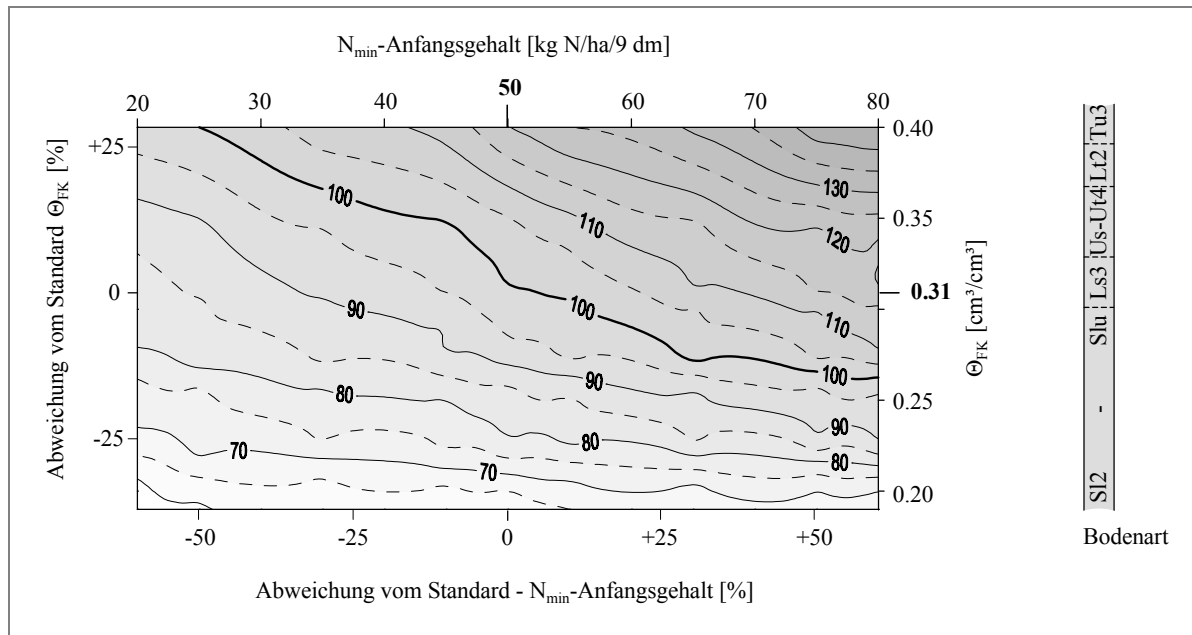


**Abb. 5.15:** Darstellung der Sensitivität des  $N_{min}$ -Wertes bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und  $C_{org}$ -Gehalt für das Modell HERMES ( $N_{min}$ -Standard = 100 % bei  $C_{org} = 1.4 \%$  und  $\Theta_{FK} = 0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , Isolinienabstufung 5 %)

Abb. 5.15 ist zu entnehmen, dass sich die Sensibilität der  $N_{min}$ -Werte mit steigendem  $C_{org}$ -Gehalt auf allen Böden erhöht. Der  $N_{min}$ -Wert reagiert auf Änderungen des  $C_{org}$ -Gehaltes bei leichten Böden in geringerem Maße als bei tonigen Böden. Sandböden zeigen eine höhere Dominanz bei der Verlagerung, während Tonböden bei der Mineralisation dominieren. Die Steigungen der Isolinien zeigen, dass bei tonigen Böden der Bestimmung des  $C_{org}$ -Gehaltes eine größere Bedeutung zukommt als der Ermittlung des  $\Theta_{FK}$ , während bei leichten Böden das Modell stärker auf Änderungen der  $\Theta_{FK}$  reagiert.

### Einfluss der Anfangsgehalte des mineralischen Stickstoffs ( $N_{min}$ )

In gleicher Weise wie für den  $C_{org}$ -Gehalt wird auch die Sensibilität auf Änderungen bei den  $N_{min}$ -Anfangsgehalten dargestellt. Abb. 5.16 zeigt, dass die Höhe der  $N_{min}$ -Anfangsgehalte auf den leichten Böden unter den gegebenen Niederschlagsverhältnissen nur einen sehr geringen Einfluss auf die Höhe des  $N_{min}$ -Wertes im Frühjahr hat, da ein Großteil des im Spätsommer noch vorhandenen Restnitrats aus dem Profil (0 - 9 dm) ausgewaschen wird. Auf den tonigen Böden wird dagegen der  $N_{min}$ -Wert im Frühjahr größtenteils durch auf dem Feld verbliebene Nitratreste aus dem Vorjahr bestimmt.



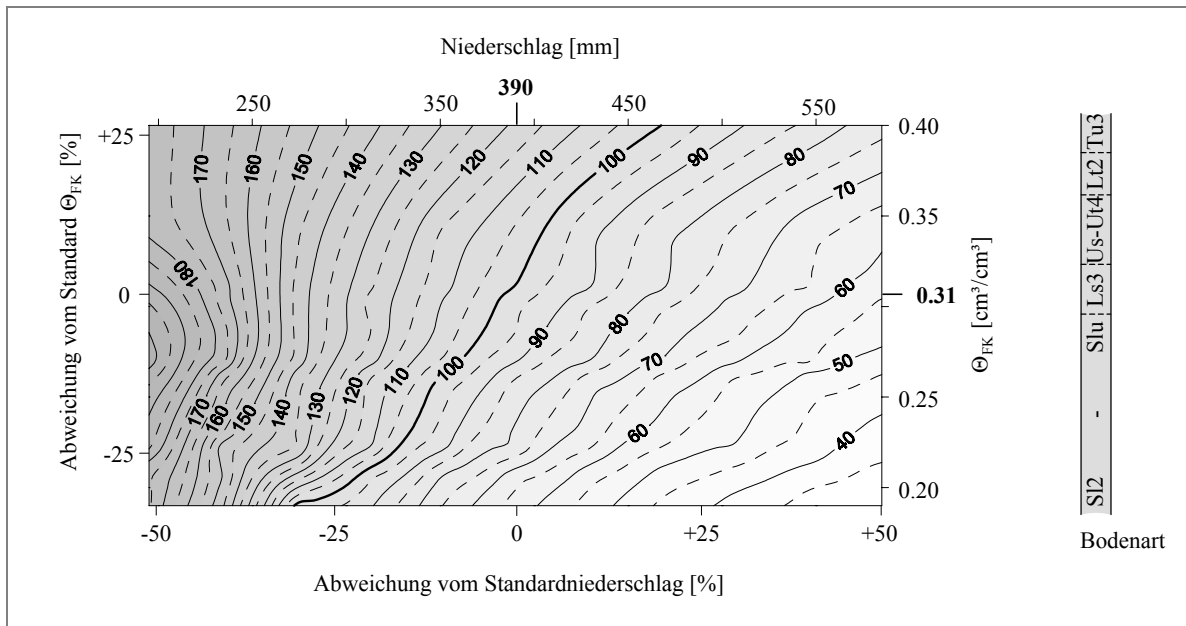
**Abb. 5.16:** Darstellung der Sensitivität des  $N_{\min}$ -Wertes bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und  $N_{\min}$ -Anfangsgehalt für das Modell HERMES ( $N_{\min}$ -Standard = 100 % bei  $N_{\min} = 50 \text{ kg N/ha/9 dm}$  und  $\Theta_{FK} = 0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , Isolinienabstufung 5 %)

### Einfluss des volumetrischen Wassergehaltes bei Feldkapazität ( $\Theta_{FK}$ )

Wie schon Abb. 5.15 und Abb. 5.16 zu entnehmen ist, nimmt die Sensibilität des Modells bezüglich des Frühjahrs- $N_{\min}$ -Wertes auf Änderung der  $\Theta_{FK}$  mit der Höhe der im Herbst vorhandenen  $N_{\min}$ -Werte zu. Die Sensibilität hängt im entscheidenden Maße von der Relation der Niederschläge zur Wasserspeicherefähigkeit der Böden ab.

### Einfluss der Niederschläge

Für die Sensibilität auf Änderungen bei der Niederschlagsmenge gilt das gleiche wie beim  $\Theta_{FK}$ . Hohe Niederschlagsmengen über die Winterperiode führen gerade auf den leichten Böden zu einer fast vollständigen Nitratauswaschung aus dem Profil (0 - 9 dm), so dass eine weitere Steigerung der Niederschläge nur noch geringe Änderungen hervorruft (Abb. 5.17). So nimmt die Sensibilität der  $N_{\min}$ -Werte mit zunehmender Niederschlagsmenge auf allen Böden deutlich ab. Bei geringen Niederschlagsmengen zeigen dagegen die  $N_{\min}$ -Werte im Bereich der lehmigen Sande die höchste Sensibilität. Diese Böden besitzen eine große nFK, d.h. die Entleerung des Bodenprofils in bezug zur FK geht relativ weit und braucht mehr Niederschlagswasser zur Wiederauffüllung (der FK).



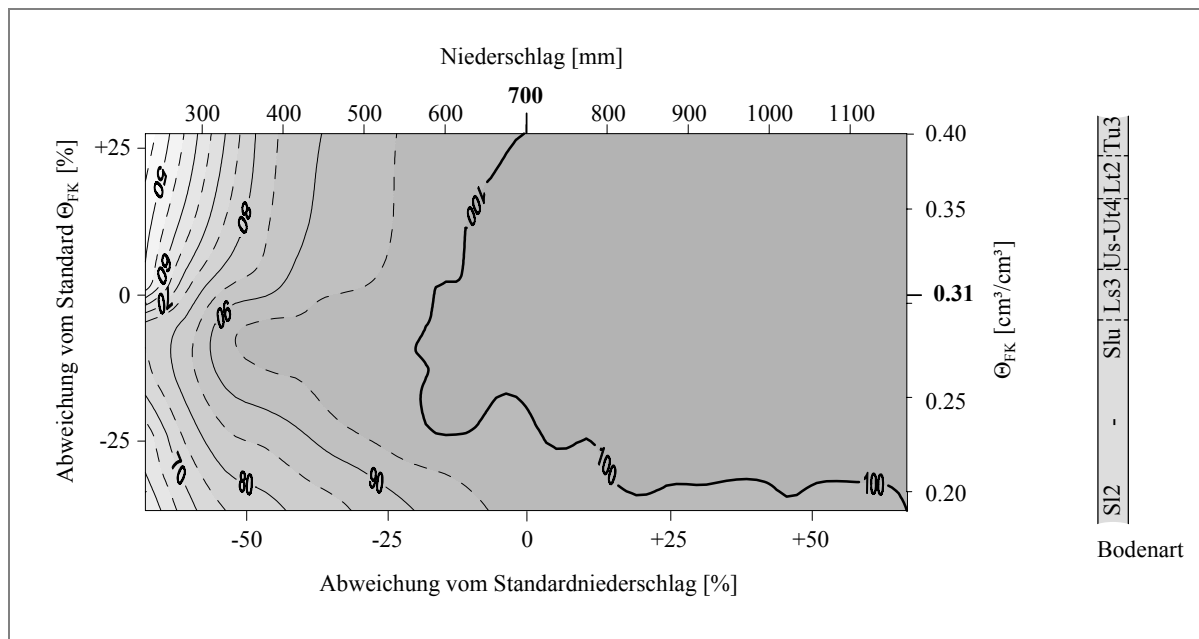
**Abb. 5.17:** Darstellung der Sensitivität des  $N_{\min}$ -Wertes bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und Niederschlagsmenge für das Modell HERMES ( $N_{\min}$ -Standard = 100 % bei 390 mm Niederschlag und  $\Theta_{FK} = 0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , Isolinienabstufung 5 %)

## 5.2.2 Simulation über die Vegetationsperiode

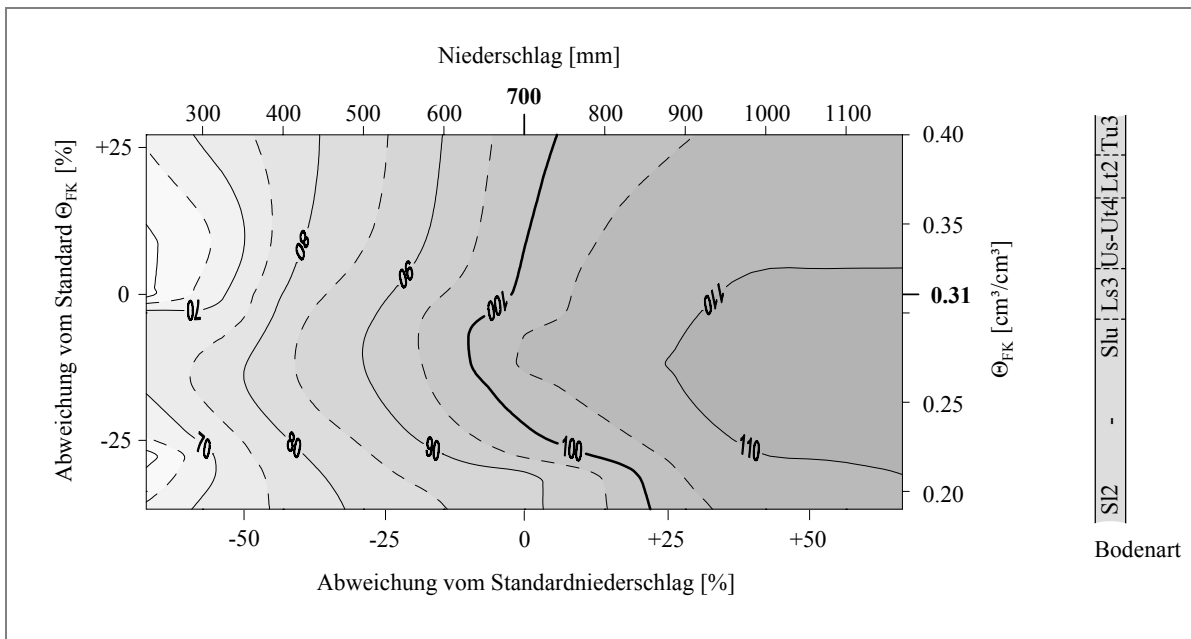
Nach dem selben Prinzip wie für die Winterperiode werden für den Vegetationszeitraum vom 01.09.00 bis 01.08.01 Modellläufe durchgeführt. Für die angebaute Wintergerste wird eine simulierte N-Düngung von 180 kg N/ha zu Grunde gelegt, die in drei Teilgaben (80/60/40 kg N) über die Vegetationsperiode verteilt ausgebracht wird. Zur Untersuchung der Sensibilität des Pflanzenmodells werden die Modellparameter maximale Photosyntheserate bei Lichtsättigung ( $A_{\max}$ ), Niederschlag und tägliche Tagesmitteltemperatur variiert. Die Berechnung wurde mit dem selben Parametersatz durchgeführt wie zuvor für die Winterperiode (Abb. 5.14). Als Zielgröße werden die oberirdische Pflanzentrockenmasse sowie die kumulative Mineralisation über den Simulationszeitraum betrachtet, da über diese Größen Rückschlüsse zum Ertrag bzw. zu den  $N_{\min}$ -Rückständen im Boden möglich sind.

### Einfluss der Niederschläge

Die Sensitivität der modellierten Biomasse ist bei geringen Niederschlagsmengen ( $< 400 \text{ mm}$ ) sehr groß, nimmt aber mit erhöhten Niederschlägen ab (Abb. 5.18). Ab einer Niederschlagssumme von  $> 700 \text{ mm}$  zeigt die Simulation, außer auf den lehmigen Sanden (z.B. S12), keinen nennenswerten Zuwachs bei der Trockenmassebildung mehr. Der hohe Grobporenanteil auf dem S12-Standort sorgt hingegen auch bei hohen Niederschlagsmengen für eine schnelle Versickerung und gewährleistet trotzdem eine ausreichend gute Bodendurchlüftung. Die Trockenmasseproduktion wird auf den S12-Standorten so erst sehr spät durch extrem hohe Niederschlagsmengen limitiert.



Sehr sensibel reagiert das Modell bei der Mineralisation auf Niederschlagsänderungen (Abb. 5.20). Über den Simulationszeitraum nimmt die mineralisierte Stickstoffmenge auf allen Böden mit steigender Niederschlagsmenge zu.

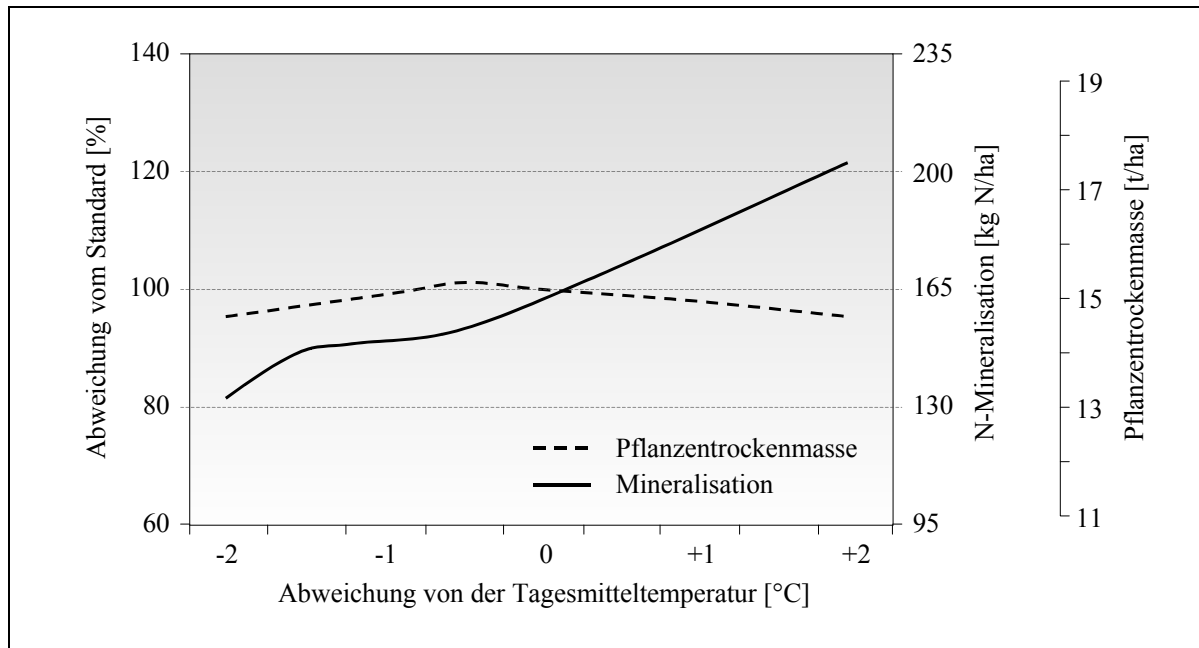


**Abb. 5.20:** Darstellung der Änderung der N-Mineralisation bei gleichzeitiger Variation von Bodenart nach KA4 und Niederschlagsmenge (N-Mineralisation beim Standard = 170 kg N/ha = 100 %)

### Einfluss der Temperatur

In Abb. 5.21 wird der Einfluss der Änderung der täglichen Temperatur auf die Mineralisation und die Trockenmassebildung von Pflanzen dargestellt. Sehr deutlich ist zu erkennen, dass eine Änderung der mittleren Tagestemperatur um 1 °C die N-Mineralisation um ca. 10 % verändert. Weniger stark ausgeprägt ist die Beziehung zwischen Trockenmassebildung und Temperatur. Mit steigender Temperatur erhöhen sich die Atmungsverluste während die Photosynthese stagniert. Somit wird nach Erreichen der optimalen Photosynthesetemperatur der Trockenmassezuwachs bei steigender Temperatur verringert.

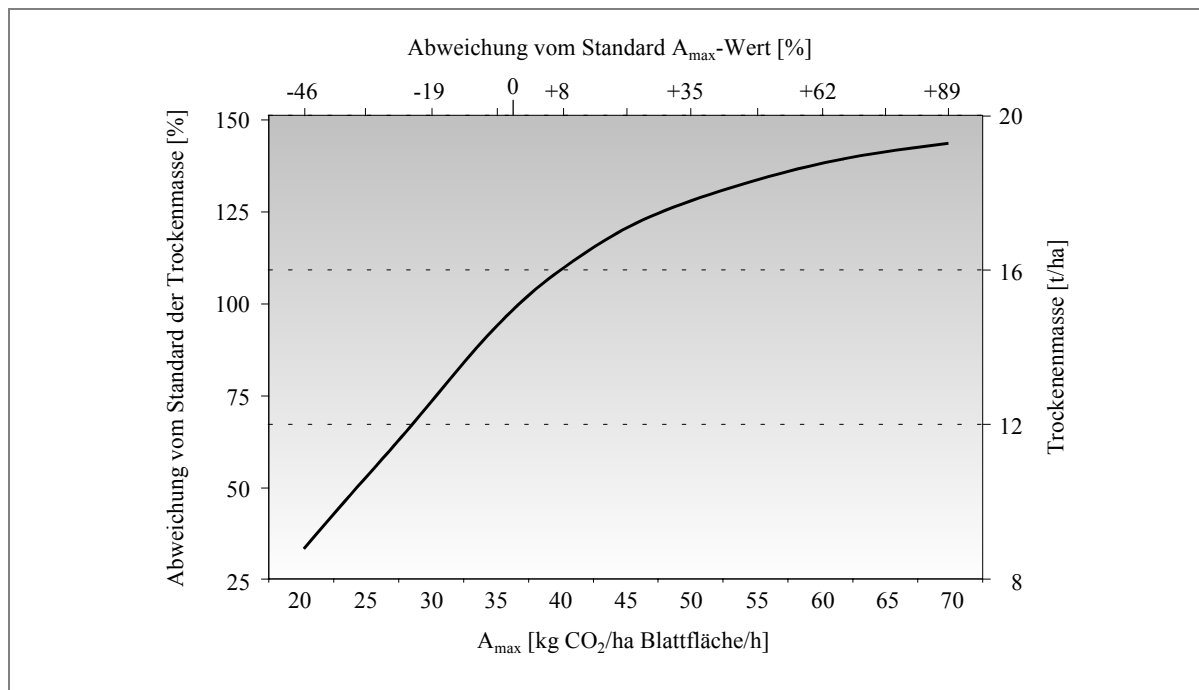




**Abb. 5.21:** Darstellung der Sensitivität von N-Mineralisation und Trocknenmassebildung bei Änderung der täglichen Tagesmitteltemperatur (Standard = 165 kg N/ha = 15.2 t TM/ha = 100 %)

#### Einfluss der maximalen Photosyntheserate bei Lichtsättigung ( $A_{\max}$ )

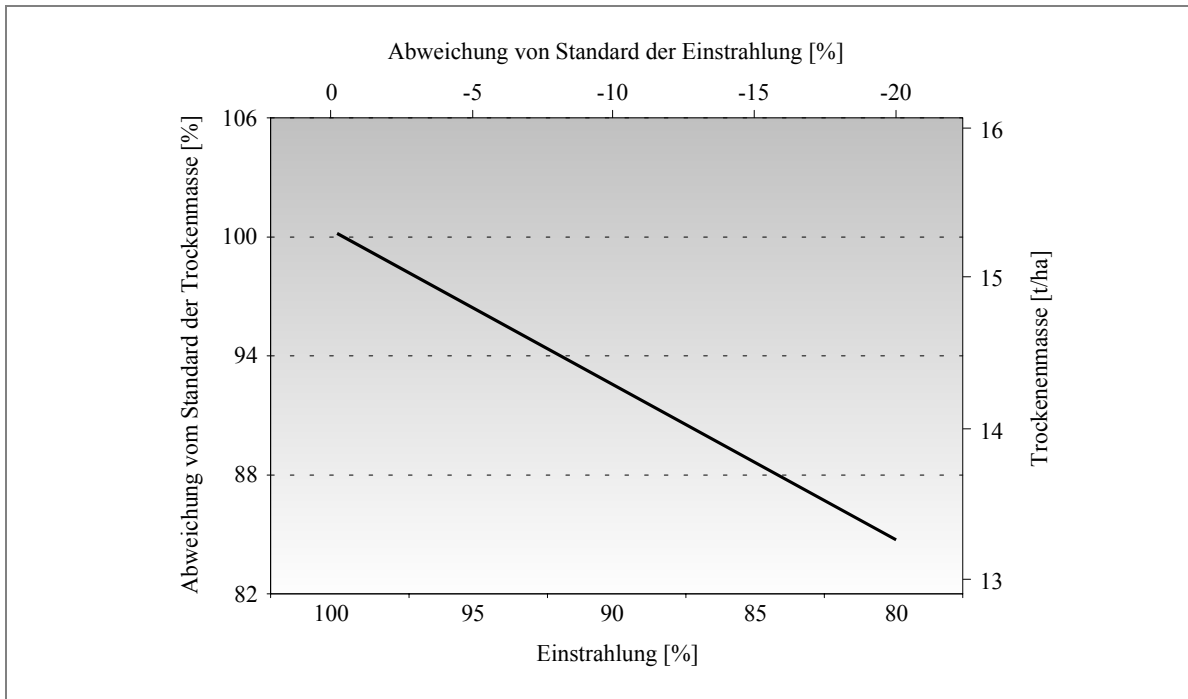
Wie man Abb. 5.22 entnehmen kann, hat die Wahl des Parameters  $A_{\max}$  einen sehr großen Einfluss auf die simulierte Trockenmassebildung. Bei hohen  $A_{\max}$ -Werten nimmt der Zuwachs bei der Trockenmassebildung kontinuierlich ab, was auf die Wirkung anderer wachstumslimitierender Einflussfaktoren (z.B. Stickstoffmangel) zurück zu führen ist.



**Abb. 5.22:** Darstellung der Sensitivität der Trockenmasseproduktion bei Änderung des  $A_{\max}$ -Wertes für das Modell HERMES (Standard = 15.2 t TM/ha = 100 % bei einem  $A_{\max}$ -Wert von 37 kg CO<sub>2</sub>/ha Blattfläche/h)

### Einfluss der Einstrahlung

Die Simulation zeigt, dass eine reduzierte Einstrahlung um 5 %, wie dies durch Beschattung von Bäumen oder Gebäuden häufig in der Praxis vorkommt, zu einem Biomasseausfall von ungefähr 4 % führt. Die Beziehung zwischen reduzierter Einstrahlung und Trockenmassebildung ist annähernd linear (Abb. 5.23). Als Standard wurde die Einstrahlungsvariante 100 % gewählt.



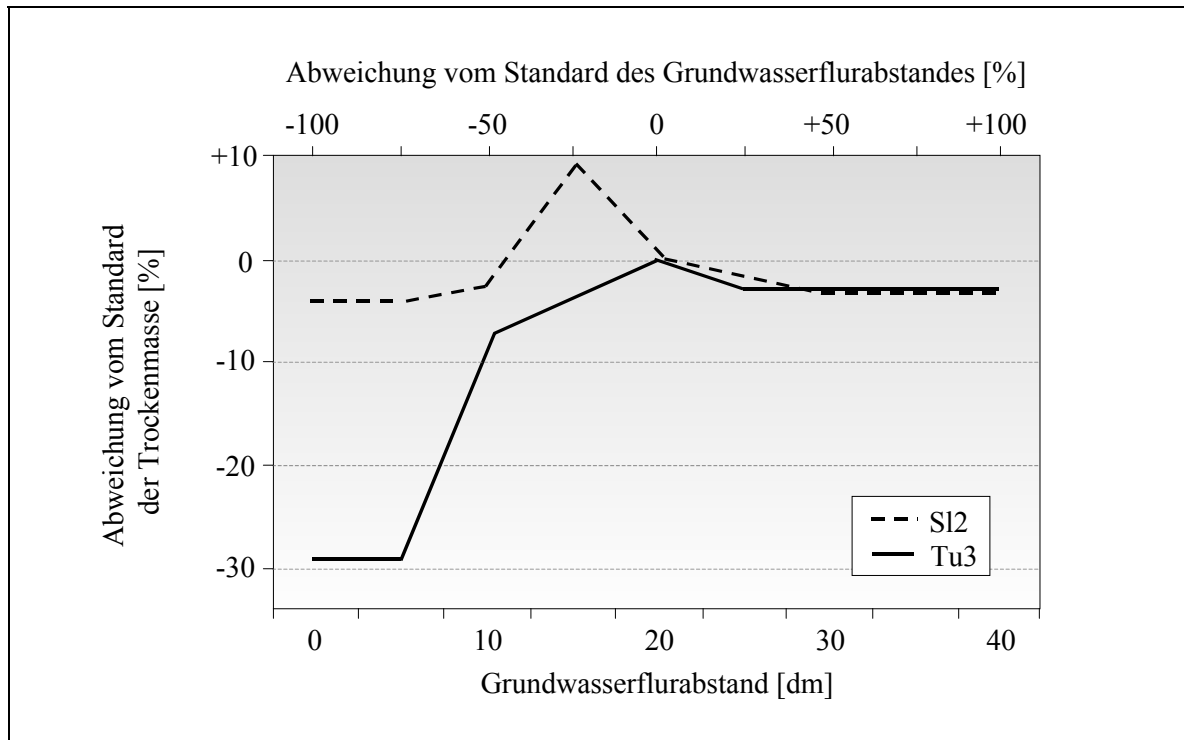
**Abb. 5.23:** Darstellung der Sensitivität der Trockenmasse bei reduzierter Einstrahlung (gebildete Trockenmasse bei 100 % Einstrahlung = 15.2 t TM/ha = Standard)

### 5.2.3 Evaluierung weiterer Einflussgrößen

Zur weiteren Untersuchung der Sensibilität des Modellansatzes werden auch die Größen Grundwasserflurabstand, Lagerungsdichte und Steingehalt variiert. Unter zur Hilfenahme eines leichten (Sl2) und eines schweren Bodenprofils (Tu3) werden die Ergebnisse der Biomassebildung miteinander verglichen.

#### Einfluss des Grundwasserflurabstandes

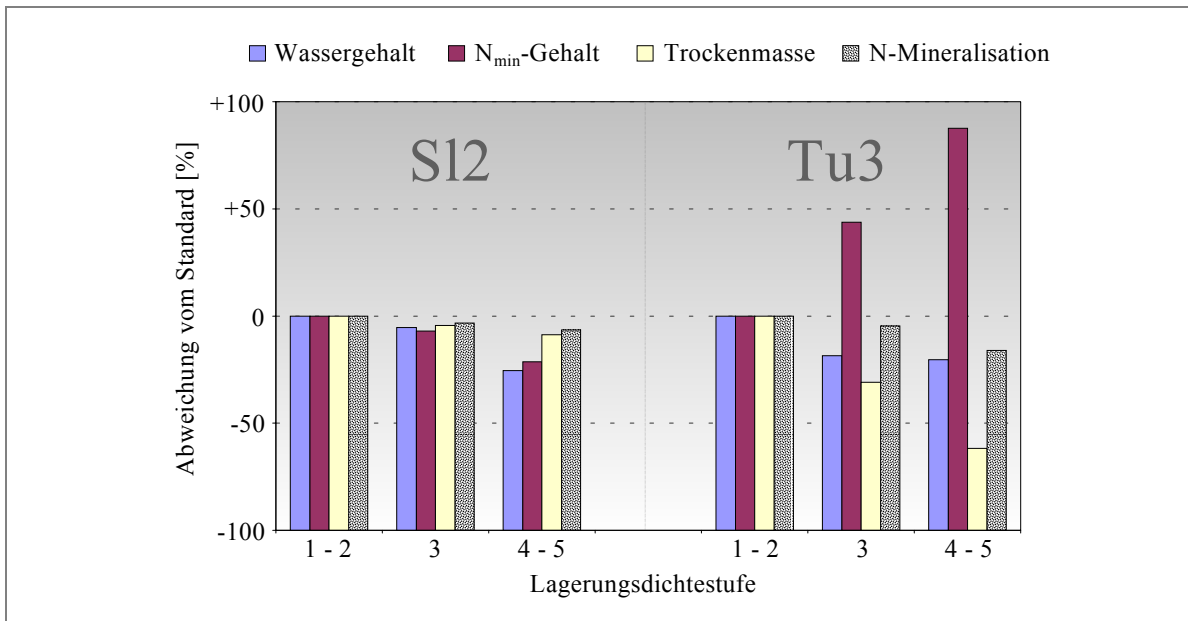
Die Sensitivität auf den Grundwasserflurabstand steigt im Modell mit abnehmender Niederschlagsmenge. Besonders in niederschlagsarmen Gebieten (< 400 mm Jahresniederschlag) kommt der Wasserversorgung durch das Grundwasser eine große Bedeutung zu. Dabei ist der Abstand zum Grundwasserspiegel entscheidend. So kann der Tonboden (Tu3) gegenüber dem leichten Sl2-Standort aufgrund des kapillaren Aufstieges Grundwasser aus tieferen Schichten für die Trockenmassebildung nutzen. Andererseits treten auf den schweren Tonstandorten bei zu geringen Grundwasserflurabständen (< 10 dm) Ertragsdepressionen durch Luftmangel auf (Abb. 5.24).



**Abb. 5.24:** Darstellung der Sensitivität der Trockenmassebildung bei Variation des Grundwasserflurabstandes stellvertretend für die Bodenarten SI2 und Tu3 (Grundwasserflurabstand beim Standard = 20 dm = 100 %) und 390 mm Jahresniederschlag

### Einfluss der Lagerungsdichte

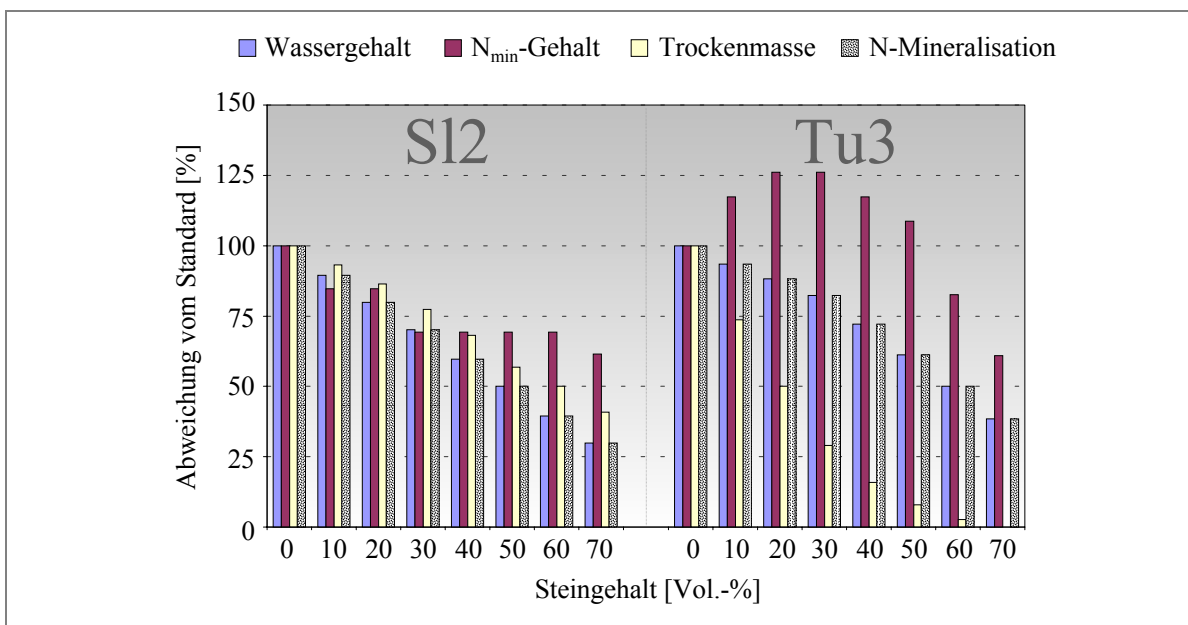
Die Zunahme der Lagerungsdichte führt im Bodenprofil zu einer Verringerung des Porenvolumens. Mit der Abnahme des Porenvolumen sinkt die Luft- und Wasserspeicherkapazität. Die Pflanzenwurzel muss mehr Energie aufbringen, um an Pflanzennährstoffe (z.B. Nitrate) und Wasser im Boden zu gelangen. Ertragsdepressionen sind die Folge. Wie man Abb. 5.25 entnehmen kann, reagiert das Modell bei schweren Tonböden (Tu3) deutlich sensibler auf Änderungen der Lagerungsdichte mit Trockenmassereduzierung als auf leichten SI2-Standorten. Eine höhere Lagerungsdichte führt auf den schweren Böden zu einer Zunahme des  $N_{\min}$ -Wertes im Bodenprofil. Die Ursache lässt sich zum großen Teil auf die verringerte N-Aufnahme durch die Pflanze zurückführen bzw. zu einem geringen Teil auch auf die wesentlich langsamere  $N_{\min}$ -Verlagerung in der Tiefe im Vergleich zu Sandböden.



**Abb. 5.25:** Darstellung der Sensitivität von Wassergehalt, N<sub>min</sub>-Gehalt, Trockenmasse und N-Mineralisation bei Änderung der Lagerungsdichtestufe (Ld) unter S12- bzw. Tu3-Böden (Ld = 1 - 2 = Standard = 100 %)

### Einfluss des Steingehaltes im Boden

Der schwere Tu3-Standort reagiert im Modell deutlich sensibler auf Steingehalte im Profil mit Ertragsdepressionen als der leichte S12-Standort (Abb. 5.26). Der zunehmende Steingehalt verringert den Aufwuchs und so bleibt mehr mineralischer Stickstoff ungenutzt im Bodenprofil zurück. Auf dem leichten S12-Standort wird der Mineralstickstoff sehr viel schneller ausgewaschen als aus dem schweren Tu3. Die Mineralisation nimmt in beiden Bodenprofilen mit dem Anstieg des Steingehaltes im Boden ab. Leichte Böden reagieren auch deutlich sensibler auf höhere Steingehalte mit verringerter Mineralisation als schwere Böden.



**Abb. 5.26:** Darstellung der Sensitivität von Wassergehalt, N<sub>min</sub>-Gehalt, Trockenmasse und N-Mineralisation bei Änderung des Steingehaltes unter S12- bzw. Tu3-Böden (Steingehalt = 0 % = Standard = 100 %)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die untersuchten Modelleingangsgrößen für HERMES unterschiedliche Sensibilitäten zeigen. Die Trockenmasseproduktion reagiert sehr sensibel auf Änderungen des Faktors  $A_{\max}$ , der Temperatur, der Sonneneinstrahlung, der Jahresniederschläge  $< 400$  mm sowie der Grundwasserflurabstände, der Lagerungsdichte und der Steingehalte im Bodenprofil. Insbesondere diese letztgenannten Parameter stellen potentielle Fehlerquellen da, da sie in der Praxis meist mit großen Unsicherheiten bestimmt werden bzw. starken Schwankungen (Grundwasseramplitude) unterliegen.

Die Modellsensitivität kann sich zwischen einzelnen Bodenarten deutlich unterscheiden. Tonböden reagieren auf Änderungen der Lagerungsdichtestufe oder des Steingehaltes deutlich sensibler als Sandböden bei der Trockenmassebildung, was bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden muss.

In Tab. 5.12 sind nachfolgend die untersuchten Parameter gewichtet dargestellt und welche Auswirkungen mögliche Fehleingaben haben würden.

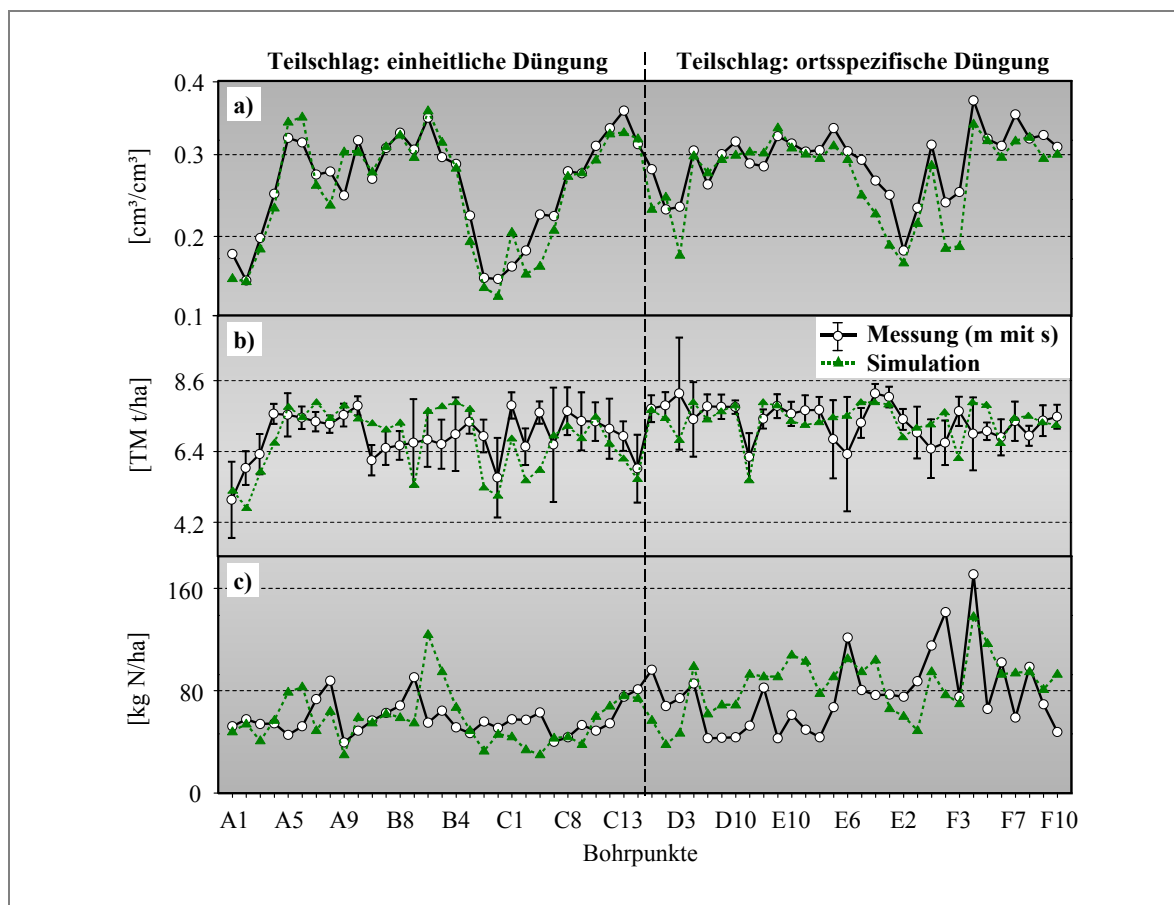
**Tab. 5.12:** Wichtung einzelner Parameter für das Modell HERMES

Eingangsparameter	mögliche Fehler bei der Angabe	Auswirkungen	Wichtung
$N_{\min}$ -Anfangsgehalt	zu niedrig zu hoch	N-Austrag - N-Austrag +	sehr hoch
$C_{\text{org}}$ -Gehalt (Humus)	zu niedrig zu hoch	Mineralisation - Mineralisation +	sehr hoch
Niederschlag	zu niedrig zu hoch	N-Austrag -, $N_{\min}$ + N-Austrag +, $N_{\min}$ -	sehr hoch
Klassen der Bodenart (nach KA4)	FK zu niedrig FK zu hoch	N-Austrag +, $N_{\min}$ - N-Austrag -, $N_{\min}$ +	sehr hoch
$A_{\max}$ -Wert	zu niedrig zu hoch	Pflanzenwachstum - Pflanzenwachstum +	sehr hoch
Sonneneinstrahlung	zu niedrig zu hoch	Pflanzenwachstum - Pflanzenwachstum +	sehr hoch
Temperatur	zu niedrig zu hoch	Mineralisation - Mineralisation +	mittel
Grundwasserflurabstand (2 m)	$< 2$ m $> 2$ m	Pflanzenwachstum -, $N_{\min}$ -, N-Austrag + Pflanzenwachstum -, $N_{\min}$ +	hoch/ mittel
Lagerungsdichtestufe	zu niedrig zu hoch	Wassergehalt +, Pflanzenwachstum + Wassergehalt -, Pflanzenwachstum -	mittel/ hoch
Steingehalt	zu niedrig zu hoch	Wassergehalt +, Pflanzenwachstum + Wassergehalt -, Pflanzenwachstum -	mittel/ hoch

### 5.3 Messung und Simulation

#### 5.3.1 Vergleich der gemessenen und simulierten Zustandsgrößen Ertrag, Wassergehalt und mineralischer Stickstoff

Um die Modellrechnungen zu überprüfen, werden die Simulationsergebnisse für die Zustandsgrößen Ertrag, Bodenwasser- und  $N_{\min}$ -Gehalt in der Wurzelzone (0 - 9 dm) zum Zeitpunkt der Ernte mit den an den jeweiligen Rasterpunkten gemessenen Werten verglichen. Zur besseren Verdeutlichung der räumlichen Beziehung zwischen Mess- und Modellwert sind die Ergebnisse von 2000 für den Schlag *Autobahn* in Form von Transekten, getrennt nach einheitlich und ortsspezifisch bewirtschafteter Teilfläche, dargestellt worden (Abb. 5.27). Die Fehlerbalken bei den Mittelwerten der Ertragsmessung repräsentieren die Standardabweichung der Einzelertragsmessung in einem Radius von 10 m um den Rasterpunkt.



**Abb. 5.27:** Vergleich gemessener und simulierter Werte nach einjähriger Simulation zu Winterweizen in 2000 auf Schlag *Autobahn*: a) beim Wassergehalt (0 - 9 dm), b) beim Kornenertrag und c) beim  $N_{\min}$ -Gehalt (0 - 9 dm) nach der Ernte

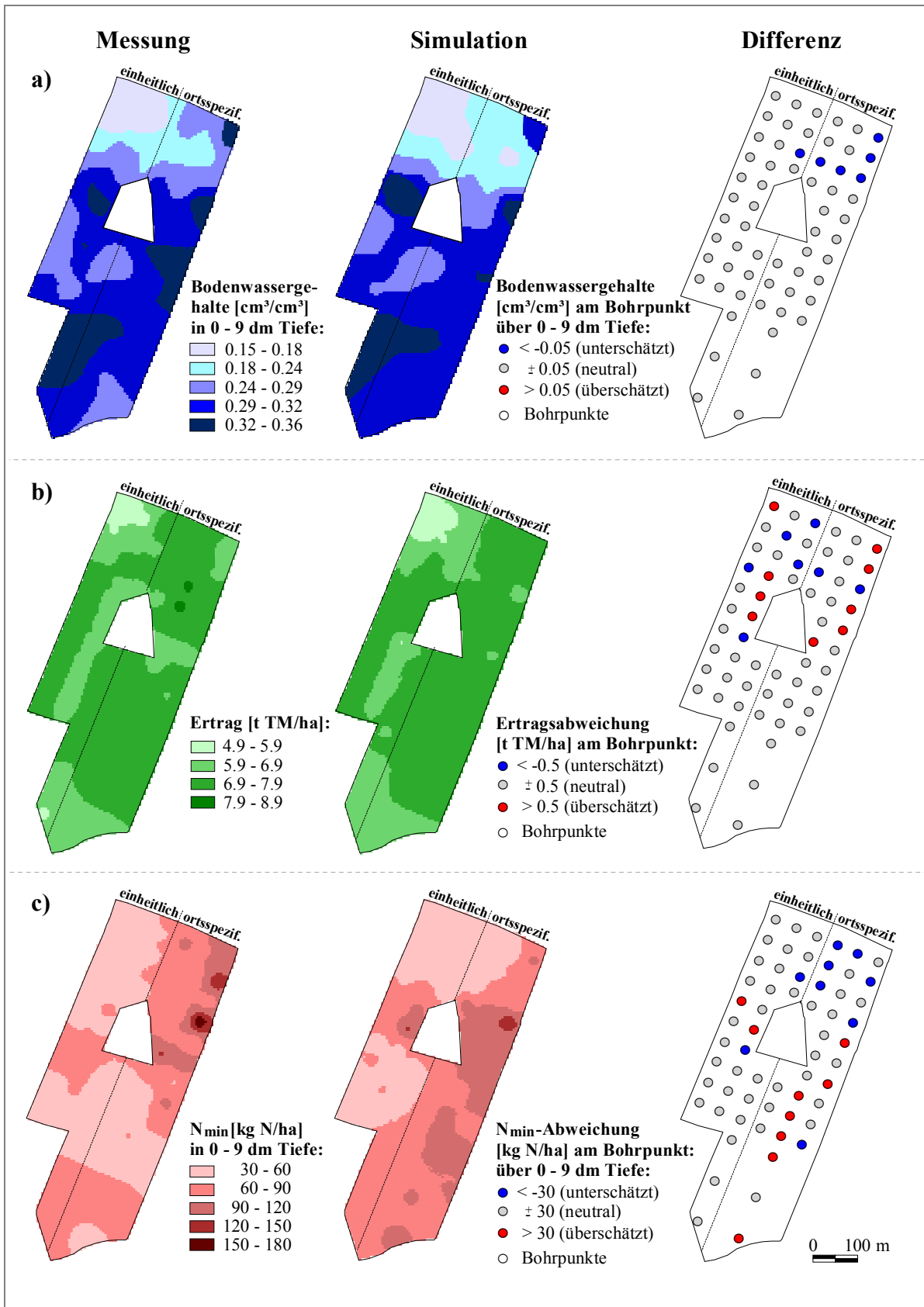
Durch die stark variierenden Tongehalte im Boden weist der Schlag *Autobahn* bei den Wassergehalten deutliche Unterschiede nach der Ernte in 2000 auf (Abb. 5.27, a). Die Wassergehalte schwanken in den oberen 0 - 9 dm Tiefe zwischen  $0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  und  $0.38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Die Abbildung zeigt eine gute Beziehung zwischen den gemessenen und den simulierten Werten ( $r^2 = 0.844$ ; Abb. 5.29, d) im ersten Untersuchungsjahr. Die Winterweizenenerträge sind durch eine befriedigende Parallelität von Messung und Simulation gekennzeichnet (Abb. 5.27, b). Nur ca. 8 % der simulierten Werte weichen um mehr als 15 % von den Ertragsmesswerten ab. Problematisch erscheint hier wieder der nordöstliche Teil der Fläche. Diese ehemalige

vernässte (Grünland-)Senke wurde nach einer Bodenaufschüttung 1993 zur Ackerfläche. Auf diesem Teilstück bleiben die gemessenen Erträge hinter dem Ertragsmittel des Gesamtschlages und den simulierten Erträgen zurück. Der starke Ertragsabfall an den Bohrpunkten *A1* und *C1* ist auf die ungünstige Lage im Vorgewende zurückzuführen. Die vermehrte Überfahrt mit schwerer Technik führt besonders in diesem Bereich zu Verdichtungen im Bodenprofil und behindert das Pflanzenwachstum.

Die Simulation der  $N_{\min}$ -Gehalte nach der Ernte wird im Mittel für die beiden Schlagteile ohne große Abweichungen widerspiegelt (Abb. 5.27, c). Trotzdem kommt es an einzelnen Punkten (z.B. Bohrpunkt *B6*) zu einer unzureichenden Abbildung der  $N_{\min}$ -Residuen nach der Ernte. Zum Teil ergeben sich größere Abweichungen in den unteren Bodenschichten, die vermutlich auf die nicht berücksichtigte Dränung der Fläche zurückzuführen sind, zu der keine genaueren Angaben zur Verfügung stehen. Auffällig ist, dass größere Abweichungen auch in den Folgejahren (Abb. 9.10 und Abb. 9.11) vorwiegend auf der ortsspezifisch gedüngten Schlaghälfte auftreten. Als mögliche Fehlerquelle wird hier vermutet, dass es im Umschaltbereich des Düngerstreuers zu Abweichungen zwischen der tatsächlich ausgebrachten Stickstoffmenge und der im Modell verwendeten Menge aus der Applikationskarte kommt (WELTZIEN, 2001).

Betrachtet man dieselben Ergebnisse jetzt flächenbezogen, so sind bestimmte Muster, sog. Schlagmuster, erkennbar. Bei den Wassergehalten (Abb. 5.28, a) wie auch bei den Erträgen (Abb. 5.28, b) werden die Schlagmuster auf Schlag *Autobahn* sehr gut durch die Simulation widerspiegelt. Lehmige Sande und tonige Lehme zeigen beim Vergleich von Messung und Simulation nur geringe Abweichungen. Auf dem vormals als Grünland genutzten nordöstlichen Teil des Schlages treten hingegen größere Abweichungen auf.

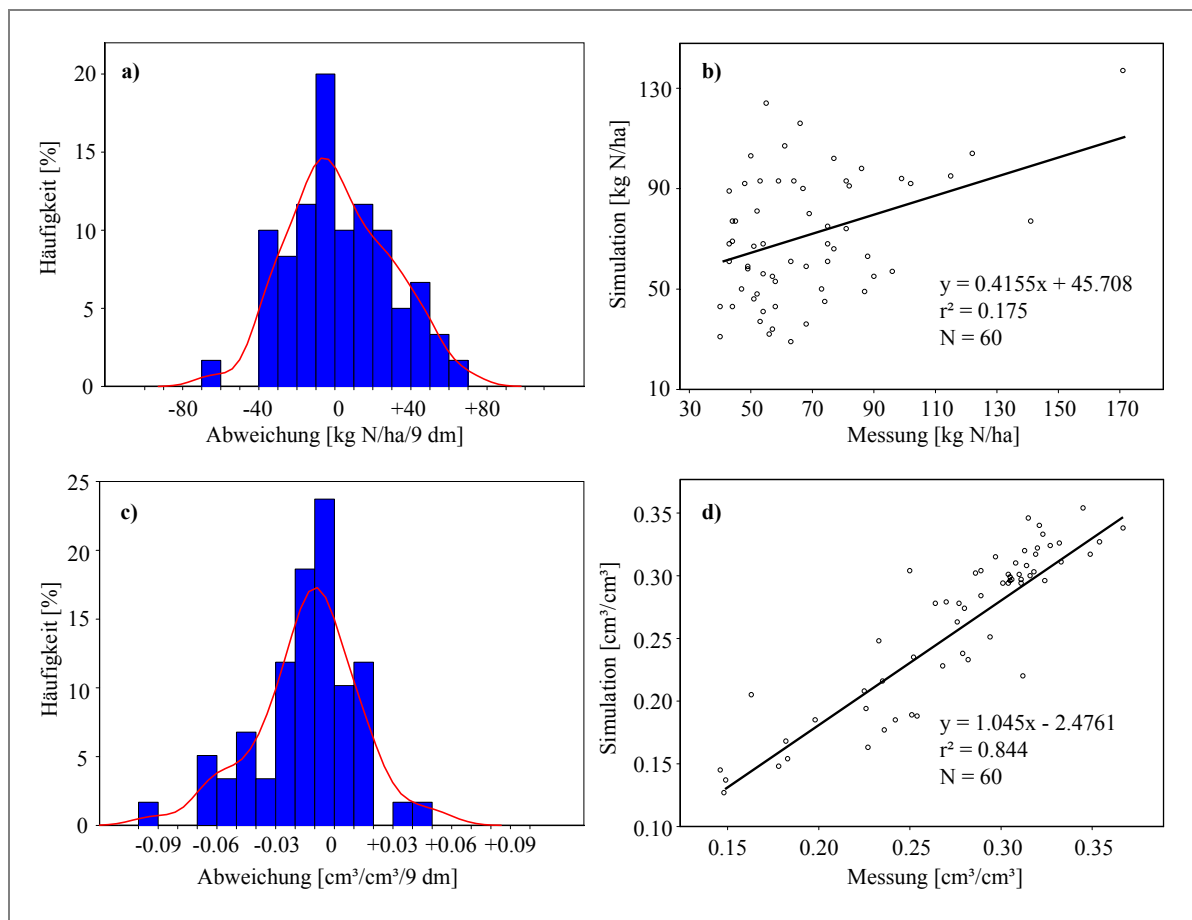
Die Muster der mineralischen Stickstoff-Residuen nach der Ernte (Abb. 5.28, c) werden nur unzureichend widerspiegelt. Die tonigen Lehme im mittleren und südlichen Schlagteil werden überschätzt, während die lehmigen Sande ohne große Abweichungen durch das Modell getroffen werden. Die Muster der  $N_{\min}$ -Residuen zeigen ebenfalls, dass der ortsspezifische Schlagteil durch die Simulation schlechter widergegeben wird als der einheitlich gedüngte (westliche) Teil. Auf mögliche Ursachen bzw. Fehlerquellen wurde im vorangegangenen Abschnitt schon hingewiesen.



**Abb. 5.28:** Vergleich der Schlagmuster von gemessenen und simulierten Werten nach einjähriger Simulation zur Ernte nach Winterweizen in 2000 auf Schlag *Autobahn*: a) beim Wassergehalt (0 - 9 dm), b) beim Ertrag und c) beim N<sub>min</sub>-Gehalt (0 - 9 dm)



Im folgenden wird die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen Simulation und Messung für das selbe Beispiel (Schlag *Autobahn*) näher betrachtet. Die in Abb. 5.29 dargestellte Verteilung der Abweichungen zwischen Simulation und Messung zeigt fast eine Normalverteilung mit Ausreißern bei den  $N_{\min}$ -Werten (a) wie auch bei den Wassergehalten (c) in 0 - 9 dm Tiefe. In 85 % aller Fälle sind die Abweichungen zwischen gemessenem und simuliertem  $N_{\min}$ -Gehalt kleiner als 40 kg N/ha, in 53 % sogar kleiner als 20 kg N/ha. Die mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung beträgt beim mineralischen Stickstoff +2.5 kg N/ha. Das Bestimmtheitsmaß liegt aber nur bei 0.175 (Abb. 5.29, b). Die Wassergehalte korrelieren deutlich besser als die  $N_{\min}$ -Gehalte. Zwischen Simulation und Messung kommt man hier auf eine hoch signifikante Korrelation von 0.844 (Abb. 5.29, d). In 90 % aller Fälle weichen die simulierten Wassergehalte über 0 - 9 dm Tiefe um weniger als 0.05  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , in 67 % sogar um weniger als 0.03  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  von den Messwerten ab. Die mittlere Abweichung bei den Wassergehalten liegt bei  $-0.007 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .



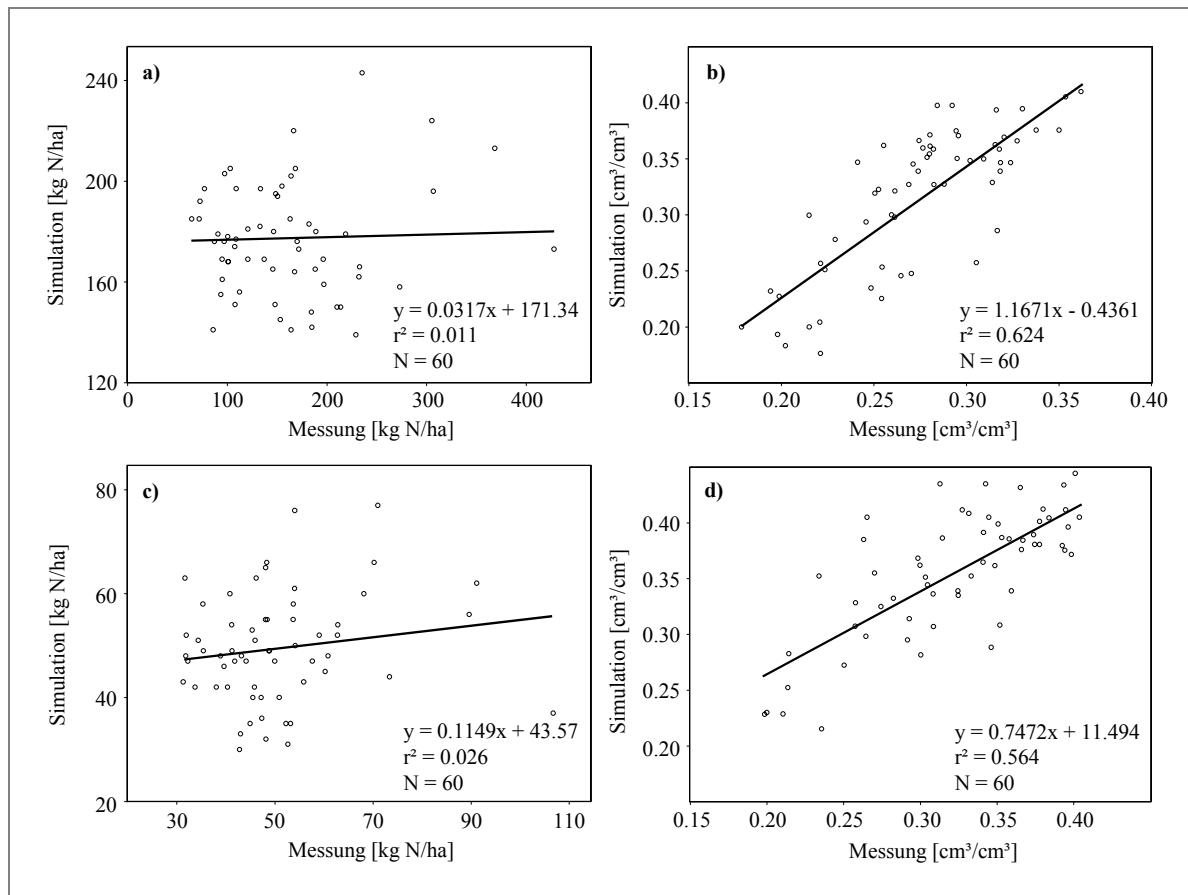
**Abb. 5.29:** Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen  $N_{\min}$ -Werten (a) und Wassergehalten (c), Vergleich von gemessenen und simulierten  $N_{\min}$ -Werten (b) und Wassergehalten (d) zur Ernte nach Winterweizen in 2000 auf Schlag *Autobahn*

Die hohe Anpassung besonders beim Wassergehalt wird erst durch Optimierung der nFK der geschätzten Standorteigenschaften Lagerungsdichte, Steingehalt, Durchwurzelungstiefe und Grundwasserflurabstand erreicht. Diese werden innerhalb ihres Unsicherheitsbereiches optimiert, um so die Anpassung an die Messwerte zu erhöhen. Die Optimierung der nFK erfolgt jeweils in der ersten Vegetationsperiode und wird für die Folgejahre beibehalten. Im folgenden soll wieder am Beispiel des Schlages *Autobahn* überprüft werden, wie sich die Anpassung der Wasser- und  $N_{\min}$ -Gehalte in den Folgejahren 2001 und 2002 verhält. Die

simulierten Werte dieser Jahre sind das Ergebnis einer kontinuierlichen Fortführung der Simulation aus 1999/2000. Das heißt:

- es werden über den gesamten Untersuchungszeitraum die gleichen Punktdaten- und Parametersätze verwendet,
- es erfolgt keine Aktualisierung des Modells anhand der Messwerte und
- die Ernte-Residuen für die Mineralisationspools werden automatisch aus dem simulierten Pflanzenwachstum des Vorjahres generiert.

Die Regressionsgleichungen zeigen in den Folgejahren beim  $N_{\min}$  keine Korrelation zwischen Messung und Simulation (Abb. 5.30, a und c).

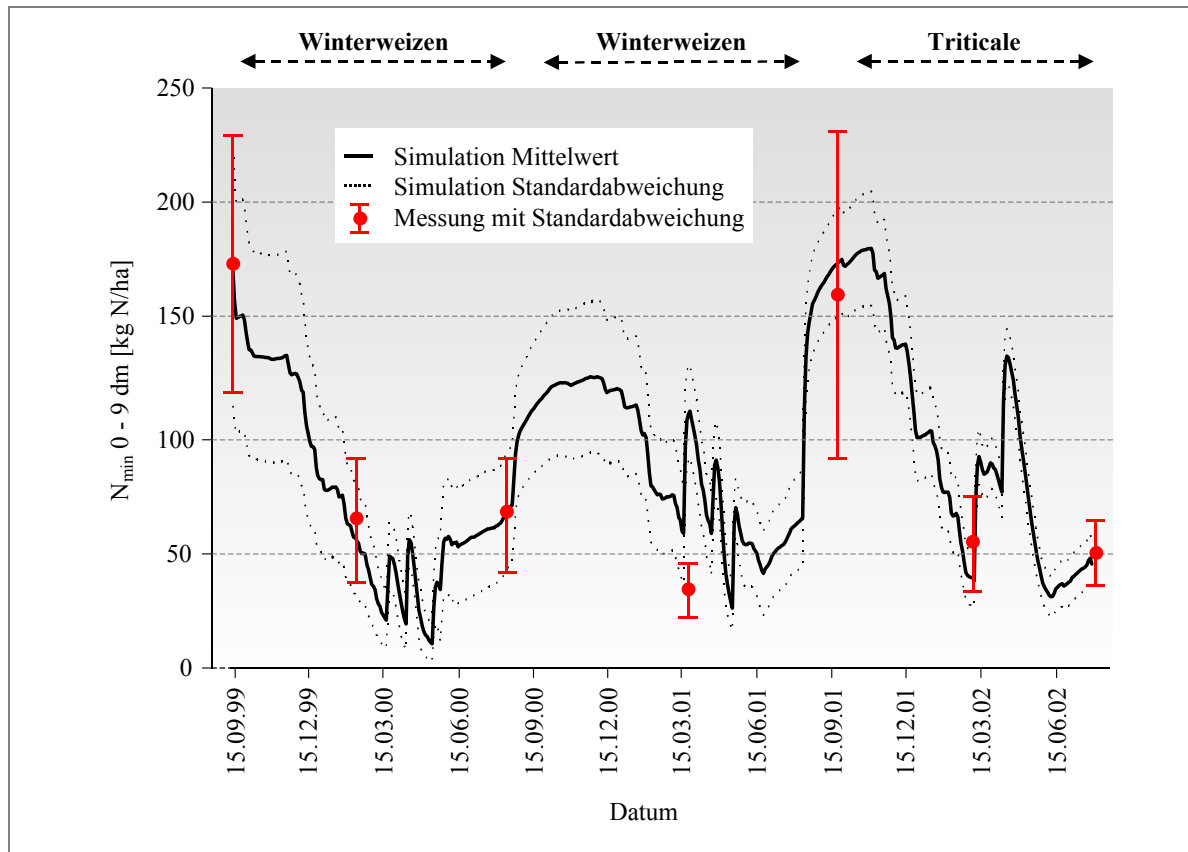


**Abb. 5.30:** Darstellung der Regressionen von gemessenen und simulierten Werten für Schlag *Autobahn* (0 - 9 dm): a)  $N_{\min}$ -Gehalte in 2001, b) Wassergehalte in 2001, c)  $N_{\min}$ -Gehalte in 2002 sowie d) Wassergehalte in 2002

Dagegen findet man beim Wassergehalt auch über einen längeren Zeitraum (drei Jahre) noch ein hohes Bestimmtheitsmaß (Abb. 5.30, b und d). Die hohe Signifikanz bei den Wassergehalten spricht für die Optimierung der nFK der geschätzten Standortparameter von 1999/2000.

Es überrascht nicht, dass die Korrelation über die Jahre langsam fällt, da sich Fehler aus dem Untersuchungsjahr 1999/2000 in den Folgejahren fortpflanzen. Des Weiteren ergeben sich Unsicherheiten bezüglich der Nährstoffzufuhr in 2000 und 2001 durch den nach der Ernte ausgebrachten Hühnermist. Die Ungenauigkeit der räumlichen Verteilung des Hühnermistes vergrößert die Heterogenität der  $N_{\min}$ -Werte innerhalb des Schlages erheblich, wie aus der Standardabweichung der  $N_{\min}$ -Messung im Herbst 2001 ersichtlich wird (Abb. 5.31).

So lässt sich schlussfolgern, dass der Wasserhaushalt durch das Modell HERMES sehr gut an den Einzelpunkten wiedergegeben wird, während sich der mineralische Stickstoffgehalt nur befriedigend abbilden lässt, da Stickstoff im Boden großen Schwankungen unterliegt. Dennoch zeigt der zeitliche Verlauf der simulierten mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte auf Schlag *Autobahn*, dass das Modell in der Lage ist, auch über einen längeren Zeitraum die Wechselwirkungen von Stickstoffdynamik und Pflanzenwachstum stabil widerzugeben (Abb. 5.31).



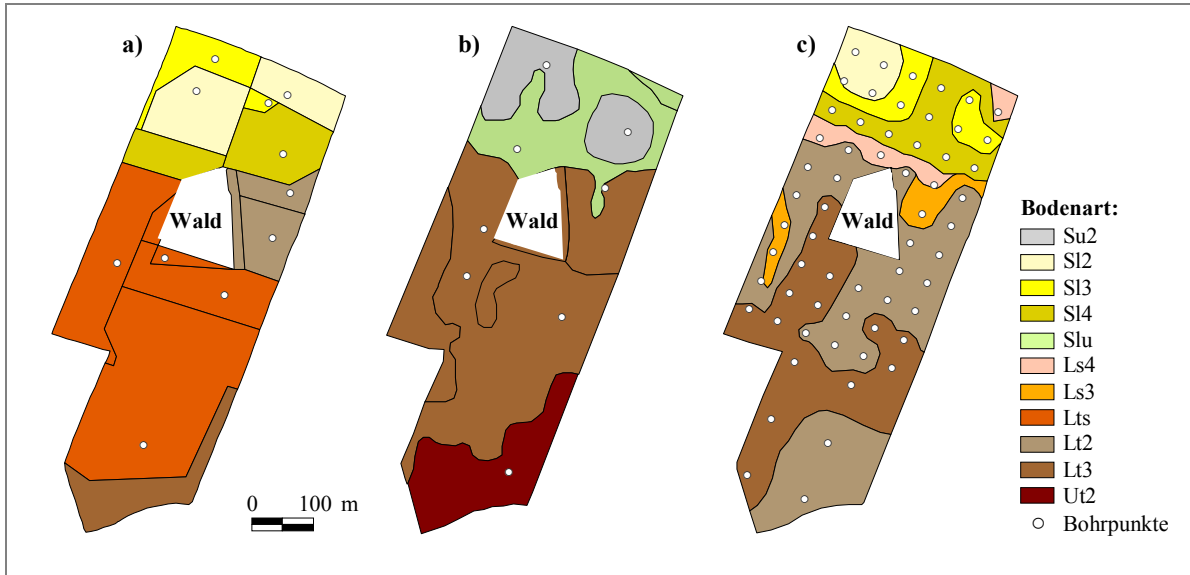
**Abb. 5.31:** Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) für Schlag *Autobahn* während des Untersuchungszeitraumes von 1999 bis 2002 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 60)

Für die vier anderen Untersuchungsschläge lassen sich die gleichen Aussagen wie für Schlag *Autobahn* treffen. Die Vergleiche der simulierten und gemessenen  $N_{\min}$ -Gehalte befinden sich für diese Schläge im Anhang (Abb. 9.12 - 9.15).

### 5.3.2 Simulierte Bewirtschaftung mit unterschiedlichen Ausgangsinformationen

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse beruhen auf Messungen aus einer Rasterbeprobung. Da engmaschige Rasterkartierungen für die Praxis zu aufwendig sind, versucht man auf Bodeninformationen aus vorhandenen Bodenkartierungen, wie der Reichsbodenschätzung oder ggf. Neukartierungen, die mit reduziertem Aufwand erstellt wurden (z.B. HBK), zurückzugreifen. Dabei soll die Frage geklärt werden, welche räumliche Erfassungsgenauigkeit (Informationsgüte) eine geeignete Grundlage zur Abschätzung von Ertragspotentialen für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung darstellt. Für die Untersuchungsschläge werden die zur Verfügung stehenden Grablochbeschriebe der Reichsbodenschätzung, die Bohrlochdaten einer Hofbodenkarte von 2001 (siehe Kap. 4.3.3) sowie

Profildaten einer Rasterbeprobung für Simulationsrechnungen herangezogen und mit Ergebnissen aus Messungen verglichen. In Abb. 5.32 sind die drei unterschiedlichen Ausgangsinformationen zur Bodenart für den Schlag *Autobahn* dargestellt. Für die Schläge *Feldscheidelinks*, *111-3*, *Kamp-Ost* und *Finkenherd* sind die unterschiedlichen Ausgangsinformationen zur Bodenart im Anhang (Abb. 9.16 - 9.19) zu finden.



**Abb. 5.32:** Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag *Autobahn*: a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung

Bei der Simulation mit Daten der Reichsbodenschätzung und der Hofbodenkarte wird zum einen mit dem Original- $C_{org}$ -Gehalt der jeweiligen Kartiereinheit aus dem Kartenmaterial berechnet, zum anderen werden für die verschiedenen Bodeneinheiten gemittelte  $C_{org}$ -Laborwerte aus der Rasterkartierung verwendet. Damit sollen die Datensätze der RBS und HBK aktualisiert bzw. die Informationsgüte für diesen Parameter erhöht werden. Tab. 5.13 zeigt die Ergebnisse für Erträge, Bodenwasser- und  $N_{min}$ -Gehalte nach der Ernte von Winterweizen für die Untersuchungsschläge im Vergleich zu den gemessenen Werten.

**Tab. 5.13 a:** Vergleich der auf unterschiedlichen Bodeninformationen basierenden Simulationswerte für Ertrag, Wasser- und N<sub>min</sub>-Gehalt beim Anbau von Winterweizen mit gemessenen Werten für die fünf Untersuchungsschläge

Variante	Ø Ertrag [t TM/ha]	r <sup>2</sup> Ertrag	Ø Wassergehalt [cm³/cm³]				r <sup>2</sup> Wg.	Ø N <sub>min</sub> [kg N/ha]				r <sup>2</sup> N <sub>min</sub>
			0 - 3 dm	3 - 6 dm	6 - 9 dm	0 - 9 dm		0 - 3 dm	3 - 6 dm	6 - 9 dm	0 - 9 dm	
Feldscheide-links/Thumby (N = 50), in 2001												
Messwert	5.9	-	0.27	0.18	0.19	0.21	-	37	8	4	50	-
RBS Original	5.9	0	0.39	0.32	0.30	0.34	0.116	37	9	13	60	0
RBS mit C <sub>org</sub> -Mittel	5.9	0	0.39	0.32	0.30	0.35	0.117	32	4	8	44	0.046
HBK Original	5.9	0	0.32	0.26	0.26	0.28	0.060	30	3	8	41	0.044
HBK mit C <sub>org</sub> -Mittel	5.9	0	0.33	0.26	0.26	0.28	0.056	31	3	9	38	0.075
Rasterdaten Original	5.9	0	0.28	0.22	0.28	0.26	0.167	33	4	16	53	0.150
Rasterdaten optimiert	5.8	0	0.26	0.18	0.20	0.21	0.691	31	3	12	46	0.274
111-3/Kassow (N = 116), in 2000												
Messwert	5.8	-	0.21	0.19	0.18	0.19	-	31	24	18	73	-
RBS Original	6.4	0	0.27	0.23	0.22	0.24	0	41	27	18	86	0
RBS mit C <sub>org</sub> -Mittel	6.1	0	0.26	0.25	0.22	0.24	0	25	20	15	60	0
HBK Original	5.6	0	0.23	0.20	0.18	0.20	0	28	26	12	66	0
HBK mit C <sub>org</sub> -Mittel	5.6	0	0.23	0.20	0.18	0.20	0	30	27	12	69	0
Rasterdaten Original	6.1	0	0.25	0.19	0.18	0.21	0.103	31	26	12	68	0
Rasterdaten optimiert	5.9	0.268	0.23	0.20	0.18	0.21	0.244	32	30	13	75	0.189
Kamp-Ost/Groß Twülpstedt (N = 60), in 2000												
Messwert	5.7	-	0.20	0.16	0.20	0.19	-	32	14	8	53	-
RBS Original	4.9	0	0.16	0.15	0.32	0.21	0	56	13	6	72	0
RBS mit C <sub>org</sub> -Mittel	4.8	0	0.16	0.15	0.32	0.21	0	54	13	6	71	0
HBK Original	4.6	0.149	0.13	0.26	0.35	0.25	0.189	34	22	37	96	0
HBK mit C <sub>org</sub> -Mittel	4.6	0.150	0.13	0.26	0.35	0.25	0.189	32	21	37	93	0
Rasterdaten Original	4.6	0.231	0.17	0.16	0.23	0.19	0.277	21	8	21	50	0
Rasterdaten optimiert	5.0	0.635	0.19	0.15	0.22	0.26	0.365	18	8	19	46	0

Bemerkung: Ø) durchschnittlich

**Tab. 5.13 b:** Vergleich der auf unterschiedlichen Bodeninformationen basierenden Simulationswerte für Ertrag, Wasser- und  $N_{\min}$ -Gehalt beim Anbau von Winterweizen mit gemessenen Werten für die fünf Untersuchungsschläge

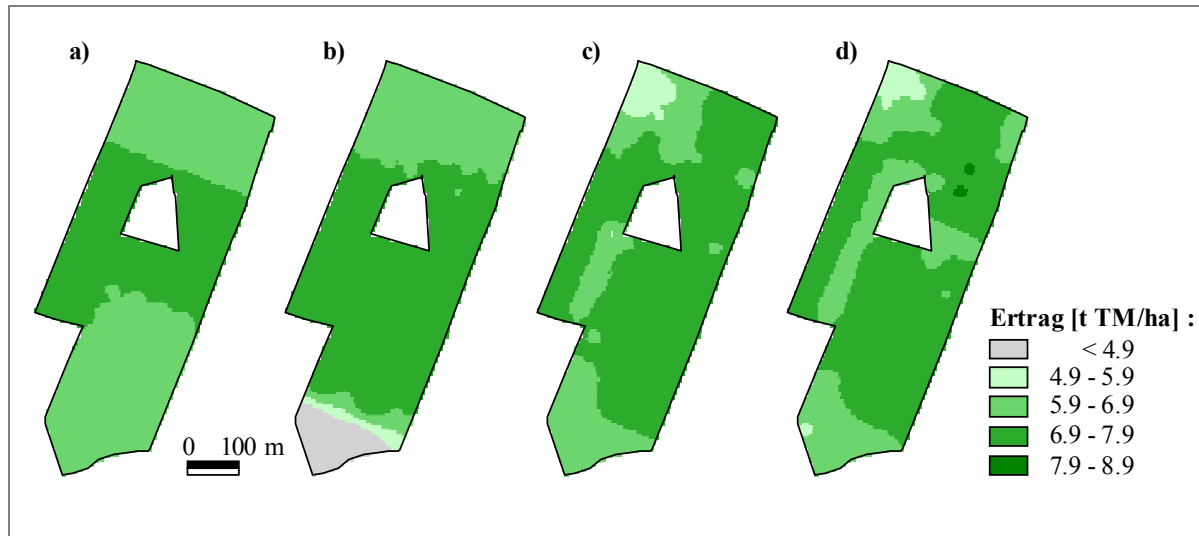
Variante	Ø Ertrag [t TM/ha]	r <sup>2</sup> Er- trag	Ø Wassergehalt [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]				r <sup>2</sup> Wg.	Ø N <sub>min</sub> -Gehalt [kg N/ha]				r <sup>2</sup> N <sub>min</sub>
			0 - 3 dm	3 - 6 dm	6 - 9 dm	0 - 9 dm		0 - 3 dm	3 - 6 dm	6 - 9 dm	0 - 9 dm	
Autobahn/Beckum (N = 60), in 2000												
Messwert	7.1	-	0.33	0.28	0.22	0.28	-	46	20	8	68	-
RBS Original	6.2	0	0.31	0.21	0.21	0.24	0.599	56	13	6	72	0
RBS mit C <sub>org</sub> -Mittel	6.2	0	0.31	0.21	0.21	0.24	0.598	54	13	6	71	0
HBK Original	7.0	0.237	0.29	0.25	0.30	0.28	0.606	43	12	14	67	0
HBK mit C <sub>org</sub> -Mittel	7.1	0.251	0.30	0.25	0.30	0.28	0.513	89	12	18	115	0
Rasterdaten Original	6.1	0.096	0.32	0.22	0.19	0.24	0.753	57	15	7	72	0.091
Rasterdaten optimiert	7.1	0.326	0.34	0.22	0.23	0.26	0.844	53	14	13	71	0.168
Finkenherd/Wulfen (N = 51), in 2002												
Messwert	6.6	-	0.21	0.24	0.19	0.21	-	82	56	33	171	-
RBS Original	6.6	0	0.31	0.28	0.28	0.29	0.171	91	110	95	296	0.277
RBS mit C <sub>org</sub> -Mittel	6.6	0	0.31	0.28	0.28	0.29	0.161	50	74	71	196	0.059
HBK Original	6.3	0	0.25	0.20	0.23	0.23	0	86	79	65	230	0.119
HBK mit C <sub>org</sub> -Mittel	6.3	0	0.25	0.20	0.23	0.23	0	58	56	50	164	0.315
Rasterdaten Original	6.6	0	0.23	0.27	0.24	0.25	0.522	53	71	51	175	0.264
Rasterdaten optimiert	6.6	0	0.22	0.25	0.19	0.22	0.773	55	71	44	170	0.246

Bemerkung: Ø) durchschnittlich

Die Simulationen mit Werten aus der RBS zeigen keinerlei Korrelationen bei den  $N_{\min}$ -Gehalten, außer auf Schlag *Finkenherd*. Die Korrelation ist mit  $r^2 = 0.277$  aber nicht signifikant. Bei den simulierten Bodenwassergehalten nach RBS sieht die Situation etwas differenzierter aus. Hier zeigen die Schläge *Kamp-Ost* und *III-3* keine, die Schläge *Feldscheidelinks* und *Finkenherd* eine schwache und der Schlag *Autobahn* eine hohe Korrelation ( $r^2 = 0.599$ ) zum Bodenwasser. Die Resultate aus den Simulationen nach HBK zeigen bei den  $N_{\min}$ -Gehalten wie auch bei den Wassergehalten keine Signifikanzen. Die einzige Ausnahme stellt der Schlag *Autobahn* dar, der bei den Wassergehalten ( $r^2 = 0.606$ ) eine hohe Signifikanz zeigt.

Die Verwendung von gemittelten C<sub>org</sub>-Gehalten führt weder bei Verwendung von Daten der HBK bzw. der RBS zu einer weiteren Verbesserung der Korrelation beim mineralischen Stickstoff, beim Bodenwasser noch beim Ertrag. Eine Ausnahme bildet der Schlag *Finkenherd*. Hier verbessern die gemittelten C<sub>org</sub>-Gehalte, die sehr hoch ausfallen, die Korrelation zu den  $N_{\min}$ -Gehalten. In den meisten Fällen zeigen die Berechnungen auf Basis der Reichsbodenschätzung eine leichte Überschätzung der  $N_{\min}$ -Werte, die überwiegend durch eine Unterschätzung der Erträge verursacht wird. Neben der Bodenart spielen noch weitere

Faktoren eine Rolle, wie die deutliche Verbesserung der Ergebnisse nach einer Optimierung der nFK für die unsicheren Eingangsgrößen (Lagerungsdichtestufe, Steingehalt, Grundwasserflurabstand und Durchwurzelungstiefe) zeigt. In den meisten Fällen führen diese zu einem sprunghaften Anstieg des Bestimmtheitsmaßes beim Wassergehalt, beim  $N_{\min}$ -Gehalt und beim Ertrag, wie die Ergebnisse auf Schlag *Autobahn* zeigen. Vergleicht man die Muster der simulierten mit der realen Ertragskarte (nach Rasterpunkten), werden die Unterschiede bei Verwendung verschiedener Bodendaten deutlich (Abb. 5.33).

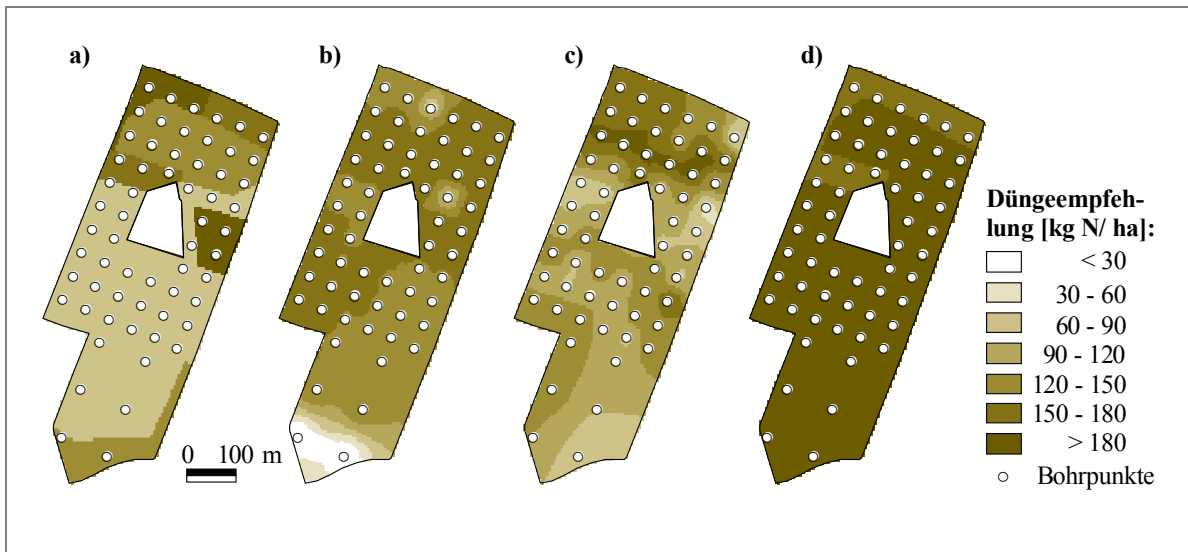


**Abb. 5.33:** Darstellung der simulierten Ertragsverteilung von Winterweizen in 2000 auf Schlag *Autobahn* bei Verwendung unterschiedlicher Bodenbasisdaten an den Rasterpunkten: a) Reichsbodenschätzung, b) Hofbodenkarte und c) Rasterbodendaten. In d) ist die reale Ertragskarte für Winterweizen dargestellt.

Am Beispiel des Schlages *Autobahn* soll auf Fehlerquellen bei den verwendeten Daten hingewiesen werden. Die großen Abweichungen zwischen realer Ertragskarte (Abb. 5.33, d) und Ertragskarte nach Reichsbodenschätzung (Abb. 5.33, a) beruhen auf einer zu hohen Annahme des Grundwasserflurabstandes von 5 dm. Als die Bodenschätzung 1964 auf der Fläche durchgeführt wurde, wurde ein Teil des Schlages noch als Grünland genutzt. 10 Jahre später wurde der Schlag teilweise drainiert und aufgeschüttet. Hinzu kommt, dass im nördlichen Teil der Fläche zu geringe Durchwurzelungstiefen (7 - 8 dm) angenommen werden, die in Kombination mit den hohen Grundwasserflurabständen (5 dm) zu Vernässung führen. Diese Annahmen begründen die Mindererträge im Vergleich zur realen Ertragsmessung. Die Hofbodenkarte (Abb. 5.33, b) zeigt beim Ertrag schon eine differenziertere Ertragsverteilung als bei Verwendung von Daten aus der Reichsbodenschätzung. Die visuelle Abschätzung der Humusgehalte durch die Kartierer stellt bei dieser Methode eine potentielle Fehlerquelle dar. So lagen die abgeschätzten  $C_{\text{org}}$ -Werte (einheitlich bei 0.87 %) deutlich unter den im Labor ermittelten Werten (Mittel: 1.74 %; siehe Abb. 5.2, b) und sind für einen Großteil der Unterschätzung beim Ertrag verantwortlich. Die Unterschätzung auf dem südlichsten Schlagteil wird hingegen durch zu hohe Schätzungen der Steingehalte (> 75 Vol.-%) hervorgerufen. Die geschätzten bzw. optimierten Steingehalte der Rasterbeprobung liegen in diesem Bereich bei  $\leq 50$  Vol.-%. Die beste Übereinstimmung mit dem Muster der realen Ertragskarte wird durch die Rasterdaten (Abb. 5.33, c) erreicht. Die kleinräumig stark variierenden ertragsbeeinflussenden Parameter (wie Steingehalt, Lagerungsdichte, Tongehalt) werden hier am besten abgebildet.

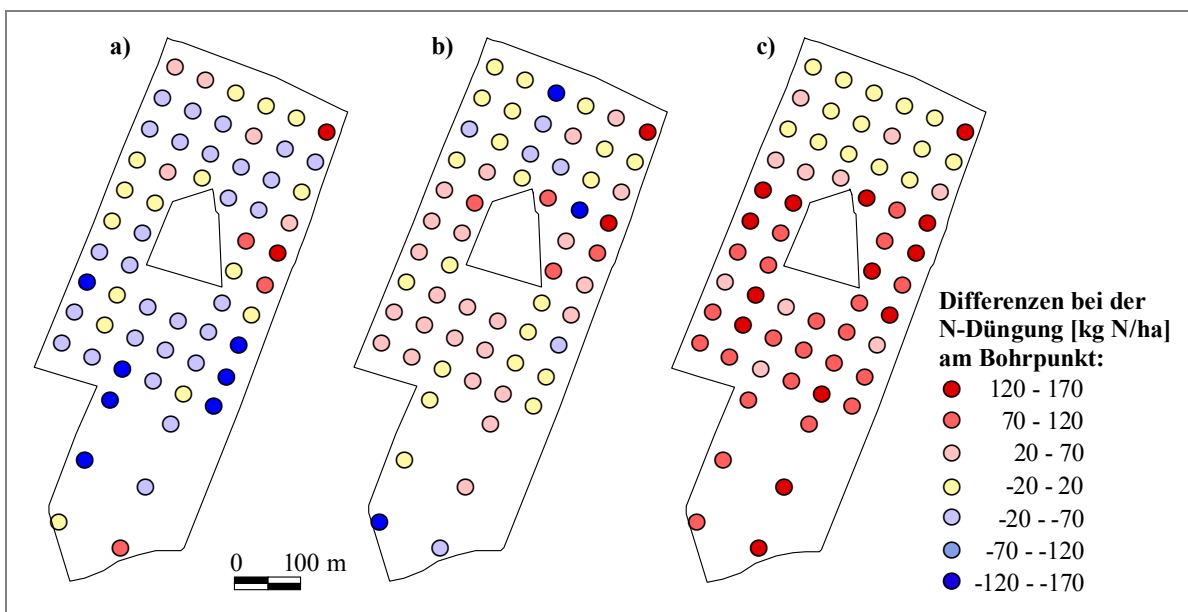
Benutzt man das Modell HERMES zur Berechnung von N-Düngungsempfehlung ergeben sich bei Verwendung der verschiedenen Bodeninformationen aus RBS, HBK sowie nach

Rasterbeprobung unterschiedlich hohe Düngermengen und Verteilungsmuster. Die Modellergebnisse wurden dann mit der Empfehlung nach *preagro-N* Modul verglichen (Abb. 5.34). Bei der Berechnung der Düngungsempfehlungen wurden alle verwendeten Datensätze durch die Wasser-, Humus- und  $N_{\min}$ -Gehalte aus der Herbstbeprobung von 1999 ergänzt.



**Abb. 5.34:** Düngungsempfehlungen nach N-Modell HERMES zu Winterweizen in 2000 auf Schlag *Autobahn* auf Basis von: a) Profildaten der Reichsbodenschätzung, b) Profildaten der Hofbodenkarte und c) Profildaten des Untersuchungsrasters. In d) ist die Düngungsempfehlung nach *preagro-N* Modul zu sehen.

Aus der Überlagerung der Karten lassen sich die Differenzen der Düngerapplikation für die einzelnen Varianten in Form von Differenzkarten darstellen (Abb. 5.35). Als Referenz dient die Berechnung auf Basis der gemessenen Einzelprofildaten. Positive Werte (rot) zeigen eine höhere Ausbringungsmenge an als die Referenzkarte und negative Werte (blau) weisen auf eine geringere Ausbringungsmenge als in der Referenzkarte hin.



**Abb. 5.35:** Darstellung der Differenzen zwischen den Düngungsempfehlungen für Schlag *Autobahn* auf Basis der Rasterpunktprofile (Referenz) zu den Modellempfehlungen auf Grundlage: a) der Reichsbodenschätzung, b) der Hofbodenkarte sowie nach Empfehlung c) des *preagro-N* Moduls



Die Abb. 5.35 (c) zeigt, dass die Düngungsempfehlung auf Basis von *preagro-N* vor allem im südlichen Teil des Schlages zu einer deutlichen Überschätzung führt. Die Ursache liegt in einer Fehleinschätzung des Ertragspotentials. Die Nichtberücksichtigung von Besonderheiten, die in der Profilbeschreibung der Reichsbodenschätzung nicht ausreichend detailliert beschrieben werden bzw. bei der Ertragspotentialabschätzung unberücksichtigt bleiben (z.B. Begrenzung des Wurzelraums durch eine Mergelschicht) führen zu dieser Fehleinschätzung. Interessant ist auch ein Vergleich von Abb. 5.35 (a) mit Abb. 5.35 (c), die die gleiche Datengrundlage (hier RBS-Daten) als Ausgangsbasis nutzen. Die Berechnung der Düngermengen erfolgte mit zwei verschiedenen Modellen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine Ursache für die zu hohe Düngerbemessung durch das *preagro-N* Modul in der Methode der Ertragspotentialabschätzung zu finden ist.

Aus der Flächengewichtung ergeben sich die in Tab. 5.14 dargestellten Gesamtdüngermengen bzw. Differenzen zur Referenzdüngung nach Modellempfehlung HERMES. Die Empfehlungen zeigen z.B. für den 20 ha Schlag *Autobahn* eine hohe Schwankungsbreite. Während die Düngungsempfehlungen auf Basis der Reichsbodenschätzung, der Hofbodenkarte und der Rasterbeprobung (Referenz) nur eine Schwankungsbreite von  $\pm 12\%$  aufweisen, weicht die Empfehlung nach *preagro-N* Modul deutlich von den anderen ab. Das *preagro-N* Modul empfiehlt eine deutlich höhere N-Düngung. Gegenüber der Empfehlung nach Rasterbeprobung ergäbe sich so ein Mehraufwand von durchschnittlich 83 kg N/ha für *Autobahn*.

**Tab. 5.14:** Düngerempfehlungen für den Gesamtschlag bei Nutzung unterschiedlicher Modelldaten für die ortsspezifische Düngung von Winterweizen

Düngungsvariante	Düngermenge [kg N]	Differenz zu 1 [kg N]	Differenz zu 1 [%]
<b><i>Feldscheide-links/Thumby – 23.2 ha, in 2001*</i></b>			
1) Modell Rasterprofil	1725	-	-
2) Modell RBS	1895	+170	+10
3) Modell Hofbodenkarte	1928	+203	+12
4) <i>preagro-N</i> (Stand: 2000)	3449	+1724	+100
<b><i>111-3/Kassow – 12.0 ha, in 2000</i></b>			
1) Modell Rasterprofil	1567	-	-
2) Modell RBS	1307	-260	-16
3) Modell Hofbodenkarte	1168	-399	-25
4) <i>preagro-N</i> (Stand: 2000)	2283	+716	+46
<b><i>Kamp-Ost/Groß Twülpstedt – 12.0 ha, in 2000</i></b>			
1) Modell Rasterprofil	1260	-	-
2) Modell RBS	1023	-237	-19
3) Modell Hofbodenkarte	951	-309	-24
4) <i>preagro-N</i> (Stand: 2000)	1982	+722	+57
<b><i>Autobahn/Beckum – 20.2 ha, in 2000</i></b>			
1) Modell Rasterprofil	2395	-	-
2) Modell RBS	2131	-264	-11
3) Modell Hofbodenkarte	2680	+285	+12
4) <i>preagro-N</i> (Stand: 2000)	4055	+1660	+69
<b><i>Finkenherd/Wulfen – 45.1 ha, in 2002</i></b>			
1) Modell Rasterprofil	6662	-	-
2) Modell RBS	4823	-1839	-28
3) Modell Hofbodenkarte	4709	-1953	-29
4) <i>preagro-N</i> (Stand: 2000)	8355	+1693	+25

Bemerkung: \*) Anbau von Wintergerste

## 5.4 Unterschiedliche Düngungsvarianten

### 5.4.1 Vergleich von einheitlicher und ortsspezifischer Düngung

Vergleicht man die unterschiedlich bewirtschafteten Teilflächen der einheitlichen und der ortsspezifischen Düngung im Hinblick auf die erzielten Erträge und die nicht ausgeschöpften Mineralstickstoffgehalte ( $N_{\min}$ ) nach der Ernte, so ist keine generelle Tendenz zu erkennen (Tab. 5.15).

**Tab. 5.15:** Vergleich unterschiedlicher Düngungsvarianten mit Modellrechnungen hinsichtlich Ertrag und  $N_{\min}$ -Gehalt nach der Ernte

Methode	Fruchtart	einheitliche Düngung				ortsspezifische Düngung			
		Mess.	s	Modell	s	Mess.	s	Modell	s
		Feldscheide-links/Thumby							
Anzahl der Bohrpunkte		25		25		25		25	
Ertrag 2001 [t TM/ha]	WG	5.9	0.7	5.8	0.1	6.0	0.9	5.9	0.1
N <sub>min</sub> 2001 [kg N/ha]		44	16	43	5	55	19	49	13
Ertrag 2002 [t TM/ha]	WRa	4.5	0.8	4.5	0.4	4.8	0.6	4.6	0.1
N <sub>min</sub> 2002 [kg N/ha]		74	23	61	7	68	24	65	10
111-3/Kassow									
Anzahl der Bohrpunkte		59		59		59		59	
Ertrag 2000 [t TM/ha]	WW	5.8	0.5	5.9	0.5	5.9	0.7	5.8	0.4
N <sub>min</sub> 2000 [kg N/ha]		70	26	80	20	76	30	71	20
Ertrag 2001 [t TM/ha]	WW	6.2	0.8	7.7	0.6	6.6	0.8	7.4	0.6
N <sub>min</sub> 2001 [kg N/ha]		51	11	56	12	54	17	53	14
Kamp-Ost/Groß Twülpstedt									
Anzahl der Bohrpunkte		27		27		32		32	
Ertrag 2000 [t TM/ha]	WW	5.8	0.8	5.0	0.6	5.6	1.0	5.0	0.7
N <sub>min</sub> 2000 [kg N/ha]		57	31	50	19	52	30	41	13
Ertrag 2001 [t TM/ha]	WG	4.6	0.5	4.6	0.4	4.6	0.4	4.7	0.5
N <sub>min</sub> 2001 [kg N/ha]		39	13	41	9	42	13	41	12
Ertrag 2002 [t TM/ha]	ZR	k.A.	-	-	-	k.A.	-	-	-
N <sub>min</sub> 2002 [kg N/ha]		25	11	6	1	25	8	6	1
Autobahn/Beckum									
Anzahl der Bohrpunkte		30		30		30		30	
Ertrag 2000 [t TM/ha]	WW	6.9	0.7	6.9	0.7	7.4	0.5	7.4	0.4
N <sub>min</sub> 2000 [kg N/ha]		58	13	57	20	77	30	83	22
Ertrag 2001 [t TM/ha]	WW	7.0	1.2	7.3	0.3	7.1	0.5	7.3	0.2
N <sub>min</sub> 2001 [kg N/ha]		165	79	173	22	155	65	180	22
Ertrag 2002 [t TM/ha]	TR	5.8	0.8	5.9	0.1	5.9	0.6	5.8	0.1
N <sub>min</sub> 2002 [kg N/ha]		55	17	50	11	46	11	49	10
Finkenherd/Wulfen									
Anzahl der Bohrpunkte		8		8		43		43	
Ertrag 2001 [t TM/ha]	WRa	3.4	0.3	3.7	0.4	3.2	0.4	3.5	0.6
N <sub>min</sub> 2001 [kg N/ha]		106	29	123	40	119	57	119	47
Ertrag 2002 [t TM/ha]	WW	6.6	0.3	6.6	0	6.6	0.7	6.6	0.1
N <sub>min</sub> 2002 [kg N/ha]		197	74	200	32	167	47	164	41

Bemerkung: k.A.) keine Angaben, Mess. – Messung

Die Ertragsmittel schwanken zwischen den einzelnen Schlagvarianten nur wenig. Bei den  $N_{\min}$ -Werten nach der Ernte weisen die Messungen schon deutlichere Unterschiede zwischen

den einzelnen Varianten auf. Aber auch hier ist kein klarer Trend erkennbar. Die Vergleiche zwischen Messung und Simulation zeigen bis auf wenige Ausnahmen, wie beim Ertrag in 2001 auf Schlag *111-3*, dass im Mittel eine gute Übereinstimmung für beide Düngungsvarianten beim Ertrag und beim  $N_{\min}$  besteht. Die  $N_{\min}$ -Gehalte differieren auf den Schlägen *Feldscheide-links*, *111-3*, *Kamp-Ost* und z.T. auch auf Schlag *Autobahn* zwischen den einzelnen Varianten um weniger als 10 kg N/ha. Auf den Schlägen *Feldscheide-links*, *111-3* und *Autobahn* werden auf der ortsspezifischen Teilfläche geringfügig höhere Erträge über den gesamten Untersuchungszeitraum gemessen, während auf den Schlägen *Kamp-Ost* und *Finkenherd* höhere Erträge eher auf der einheitlich gedüngten Seite erzielt werden.

Die Ertragsdifferenzen betragen auf dem Schlag *Autobahn* in 2000 zwischen der einheitlich und ortsspezifisch gedüngten Variante im Durchschnitt 0.5 t TM/ha. Im Durchschnitt über alle Schläge und Untersuchungsjahre werden auf der ortsspezifisch bewirtschafteten Seite jedoch nur 0.1 t TM/ha mehr geerntet als auf der einheitlich gedüngten. Betrachtet man die Standardabweichungen für die gemessenen  $N_{\min}$ -Werte auf den Schlägen *Feldscheide-links*, *111-3* und *Finkenherd* (ohne 2002), entfallen die größten Abweichungen vom Mittel auf die ortsspezifische Variante. Auf den Schlägen *Kamp-Ost* und *Autobahn* findet man die größten Standardabweichungen beim  $N_{\min}$  zum Großteil auf der einheitlich gedüngten Variante. Lediglich in 2000 zeigt sich auf Schlag *Autobahn* beim  $N_{\min}$  ein anderes Bild.

#### **5.4.2 Szenariorechnung für eine einheitliche und eine ortsspezifische Bewirtschaftung des Gesamtschlages**

Da die Flächenausstattung der beiden Teilschläge unterschiedlich ist, bietet erst ein Simulationsszenario die Voraussetzungen, Ergebnisse für identische Flächen, in diesem Fall für den Gesamtschlag, miteinander zu vergleichen. Für die Schläge *Feldscheide-links* und *Kamp-Ost* zeigen die Szenariorechnungen für die einheitliche und die ortsspezifische Bewirtschaftung bei annähernd gleichen Düngungsmengen keine Unterschiede beim Ertrag und nur geringe Abweichungen bei den  $N_{\min}$ -Residuen am Erntetag (Tab. 5.16).

**Tab. 5.16:** Vergleich einheitlicher und ortsspezifischer Düngung bei virtueller Übertragung des jeweiligen Düngungsregimes auf den Gesamtschlag unter Winterweizen

Düngungs- variante	Düngung				Ertrag				N <sub>min</sub> am Erntetag			
	Mittel [kg N/ha]	Min	Max	CV [%]	Mittel [t TM/ha]	Min	Max	CV [%]	Mittel [kg N/ha]	Min	Max	CV [%]
<b><i>Feldscheide-links/Thumbby (n = 50), in 2001*</i></b>												
Real (mit Schlagteilung)	<b>187</b>	186	196	2.0	<b>5.8</b>	5.4	5.9	2.0	<b>46</b>	36	81	2.0
Szenario einheitlich	<b>186</b>	186	186	0.0	<b>5.8</b>	5.4	5.9	2.0	<b>45</b>	36	81	2.0
Szenario ortsspezifisch	<b>189</b>	186	196	3.0	<b>5.8</b>	5.4	5.9	2.0	<b>46</b>	36	81	2.0
<b><i>III-3/Kassow (n = 116), in 2000</i></b>												
Real (mit Schlagteilung)	<b>220</b>	185	240	8.1	<b>5.9</b>	5.0	7.0	7.5	<b>75</b>	37	131	28.0
Szenario einheitlich	<b>220</b>	220	220	0.0	<b>5.9</b>	5.0	7.0	7.5	<b>82</b>	42	131	23.0
Szenario ortsspezifisch	<b>217</b>	185	240	11.0	<b>5.9</b>	5.0	7.0	7.5	<b>69</b>	35	127	30.0
<b><i>Kamp-Ost/Groß Twülpstedt (n = 59), in 2000</i></b>												
Real (mit Schlagteilung)	<b>168</b>	40	185	26.0	<b>5.0</b>	3.8	6.7	13.2	<b>46</b>	22	102	36.0
Szenario einheitlich	<b>170</b>	170	170	0.0	<b>5.0</b>	3.8	6.7	13.2	<b>46</b>	25	102	48.0
Szenario ortsspezifisch	<b>160</b>	40	185	34.0	<b>5.0</b>	3.8	6.7	13.2	<b>48</b>	22	102	38.0
<b><i>Autobahn/Beckum (n = 60), in 2000</i></b>												
Real (mit Schlagteilung)	<b>195</b>	155	215	8.5	<b>7.1</b>	4.9	8.2	9.4	<b>68</b>	40	171	36.7
Szenario einheitlich	<b>185</b>	185	185	0.0	<b>7.1</b>	5.4	7.7	8.7	<b>63</b>	30	124	32.4
Szenario ortsspezifisch	<b>204</b>	155	215	8.2	<b>7.1</b>	5.4	7.7	8.7	<b>74</b>	27	147	38.2
<b><i>Finkenherd-141/Wulfen (n = 51), in 2002</i></b>												
Real (mit Schlagteilung)	<b>184</b>	160	210	7.9	<b>6.6</b>	6.0	6.7	1.4	<b>170</b>	86	258	24.0
Szenario einheitlich	<b>205</b>	205	205	0.0	<b>6.6</b>	6.0	6.7	1.4	<b>194</b>	102	276	13.0
Szenario ortsspezifisch	<b>180</b>	160	210	6.6	<b>6.6</b>	6.0	6.7	1.4	<b>166</b>	86	258	24.0

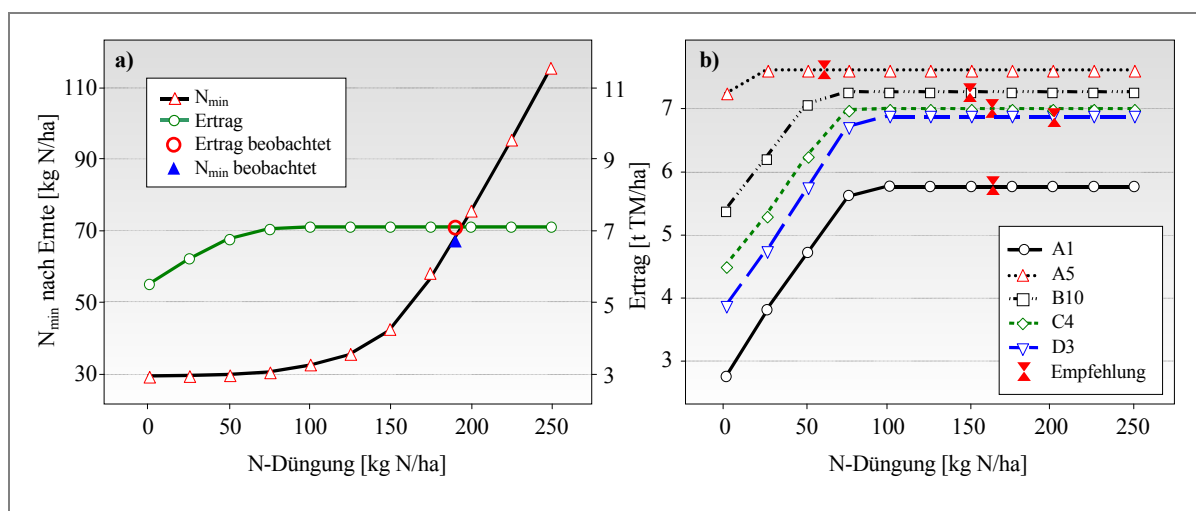
Bemerkung: \*) Anbau von Wintergerste

Die Beispiele der Schläge *Autobahn* und *Finkenherd* zeigen auch bei reduzierten Düngermengen von 10 - 14 % zwischen den einzelnen Varianten keine Ertragsminderung. Bei den N<sub>min</sub>-Nacherntegehalten sind aber deutliche Unterschiede erkennbar. Hier führt eine Herabsetzung der Düngermenge sofort zu einer Reduzierung der N<sub>min</sub>-Gehalte am Erntetag. Bei der Simulationsrechnung reagiert der Schlag *III-3* besonders sensibel auf veränderte Düngermengen.

### 5.4.3 Simulierte Effekte bei unterschiedlichen Düngungsszenarien

Aus den Ergebnissen der bislang auf den Standorten angewandten Verfahren zur Düngungsbedarfsermittlung lassen sich keine signifikanten Unterschiede beim Ertrag zwischen einheitlicher und ortsspezifischer Düngung nachweisen. Dies liegt zum einem an den geringen Unterschieden bei den N-Mengen für die Varianten einheitlich und ortsspezifisch. So unterscheiden sich die durchschnittlichen N-Düngermengen zwischen den beiden Varianten auf den Schlägen *Feldscheide-links* und *111-3* nur um 3 kg N/ha, auf dem Schlag *Kamp-Ost* sind es 10 kg N/ha. Nur auf den Schlägen *Autobahn* und *Finkenherd* gibt es deutlichere Unterschiede bei der N-Düngung zwischen der einheitlich und ortsspezifisch gedüngten Variante. Auf diesen Flächen betragen die durchschnittlichen Differenzen zwischen den einzelnen Varianten zwischen 19 kg N/ha (Schlag *Autobahn*) und 25 kg N/ha (Schlag *Finkenherd*; Tab. 5.16). Der Hauptgrund, warum keine signifikanten Unterschiede beim Ertrag messbar sind, liegt auf allen Schlägen in der zu hoch bemessenen N-Menge begründet, die sich schon im Bereich des Luxuskonsums für Pflanzen bewegt. So bringt auch eine weitere Erhöhung der N-Düngung keinen messbaren Zuwachs beim Ertrag.

Die Unterschiede bei den residualen  $N_{\min}$ -Mengen sind insgesamt gering und spiegeln im wesentlichen die Unterschiede in der Gesamthöhe der Düngung wider. Die nach der Ernte im Boden verbleibenden Mineralstickstoffgehalte deuten darauf hin, dass die bislang applizierten Düngermengen über dem Optimum liegen, an dem pro eingesetztem kg N noch ein Mehrertrag erzielt wird. Um dieser Fragestellung nachzugehen wird für den Schlag *Autobahn* eine Berechnung des Düngungsbedarfs mit Hilfe einer hierfür mehrfach erprobten Version des Modells HERMES vorgenommen. Unter Verwendung der vorhandenen räumlichen Daten sowie der Witterungsdaten wird eine Berechnung des Stickstoffdefizits für die unterschiedlichen Wachstumsphasen des Weizens vorgenommen (KERSEBAUM & BEBLIK, 2001). Zusätzlich erfolgt noch eine in 10 % Schritten abgestufte Variation der empfohlenen Düngung an den Rasterpunkten, um die Modellempfehlung kritisch auf Ertragswirkung und verbleibende  $N_{\min}$ -Gehalte nach der Ernte zu hinterfragen. In Abb. 5.36 (a) wird der Effekt der unterschiedlichen Düngungshöhe auf Ertrag und  $N_{\min}$ -Gehalt nach der Ernte für den Schlag *Autobahn* dargestellt und mit dem Mittelwert über alle Rasterpunkte verglichen.



**Abb. 5.36:** Darstellung simulierter Effekte für unterschiedliche Düngermengen zu Winterweizen während der Vegetationsperiode 2000 auf Schlag *Autobahn*: a) Mittelwerte über alle Rasterpunkte mit Darstellung der beobachteten Mittelwerte aus der realen Bewirtschaftung, b) für ausgewählte Bohrpunkte des Probenahmerasters mit Modellempfehlung zur Düngung nach HERMES

Am Verlauf der Mittelwerte wird deutlich, dass es bis zum Erreichen des Ertragsmaximums kaum eine Reaktion bei den  $N_{\min}$ -Gehalten gibt. Erst nach Ausschöpfung des Aufnahmepotentials steigen die Restgehalte des Mineralstickstoffs an. D.h., der Ertragszuwachs pro eingesetztem Kilogramm Stickstoff flacht signifikant mit zunehmender Stickstoffmenge ab. Die optimale Ertragswirkung vom Stickstoff liegt also unterhalb des Ertragsmaximums. Erwähnt sei hier noch, dass im Modell ein Ertragsabfall durch Überdüngung (Lagergetreide) nicht berücksichtigt wird.

Zur Verdeutlichung der Unterschiede innerhalb des Schlages werden für ausgewählte Bohrpunkte des Rasters Ertragskurven (Abb. 5.36, b) dargestellt. Die ausgewählten Bohrpunkte stehen hier exemplarisch für bestimmte Bodenarten, z.B. *A1* für lehmigen Sand, *C4* für sandigen Lehm oder *A5* für lehmigen Ton. Der Vergleich zeigt deutliche Unterschiede beim Ertragsniveau wie auch beim Verlauf der Ertragskurven. So reagieren lehmige Sande (Bohrpunkt *A1*) deutlich sensibler auf Düngungsmaßnahmen bis 100 kg N/ha mit Ertragssteigerungen als lehmige Tone (Bohrpunkt *A5*). Die Sensibilität in diesem Bereich wird durch das unterschiedliche N-Nachlieferungsvermögen und die unterschiedlichen  $N_{\min}$ -Anfangsgehalte der Böden (an den Rasterpunkten) bestimmt.

Gut erkennbar ist an den abgebildeten Einzelpunkten, dass die Modellempfehlung z.T. deutlich oberhalb des Punktes liegt, an dem der Ertragszuwachs pro eingesetzten Kilogramm Stickstoff abflacht. Die Ursache dafür liegt in der Berechnungsweise für die Düngungsempfehlung, die ein festes Proteinziel von 14 % in der Korntrockenmasse vorgibt, so dass bei geringer Düngung zunächst der Proteingehalt im Korn absinkt, bevor das Modell mit Ertragsabnahme reagiert.

Weiterhin wird bei der Simulation ein gewisser Sicherheitsabstand zum kritischen N-Gehalt in der Pflanze gewahrt, unterhalb dessen es zu einer Wachstumsdepression kommt.

An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, dass sich die Düngungsberechnung ausschließlich auf die jeweilige Situation des Schlages mit z.T. hohen  $N_{\min}$ -Frühjahrsgehalten bezieht und nicht auf andere Jahre übertragen werden kann.

Der Vergleich zwischen einheitlicher betriebsüblicher Stickstoffdüngung und Düngung nach Modell (HERMES) zeigt auf allen fünf Untersuchungsschlägen eine deutliche N-Überversorgung gegenüber der Modellempfehlung beim Anbau von Wintergetreide (Tab. 5.17).

**Tab. 5.17:** Variantenvergleich zwischen einheitlicher Düngung und Düngung nach Modellempfehlung (HERMES) hinsichtlich der Reduzierung der Düngermenge

Schlag	Größe [ha]	An- bau	An- bau- jahr	durchschnittliche Düngermenge <sup>#</sup> [kg N/ha]		Reduzierung der Dünger- menge <sup>*</sup> [kg N/ha]	Kostensparnis für den Gesamt- schlag <sup>*</sup> [€]
				einheitlich	Modell		
<i>Feldscheide- links</i>	23.2	WG	2001	150	74	-76	882
<i>111-3</i>	12.0	WW	2000	220	150	-70	420
<i>Kamp-Ost</i>	12.0	WW	2000	170	103	-67	402
<i>Autobahn</i>	20.2	WW	2000	185	127	-58	586
<i>Finkenherd</i>	45.1	WW	2002	210	153	-57	1285

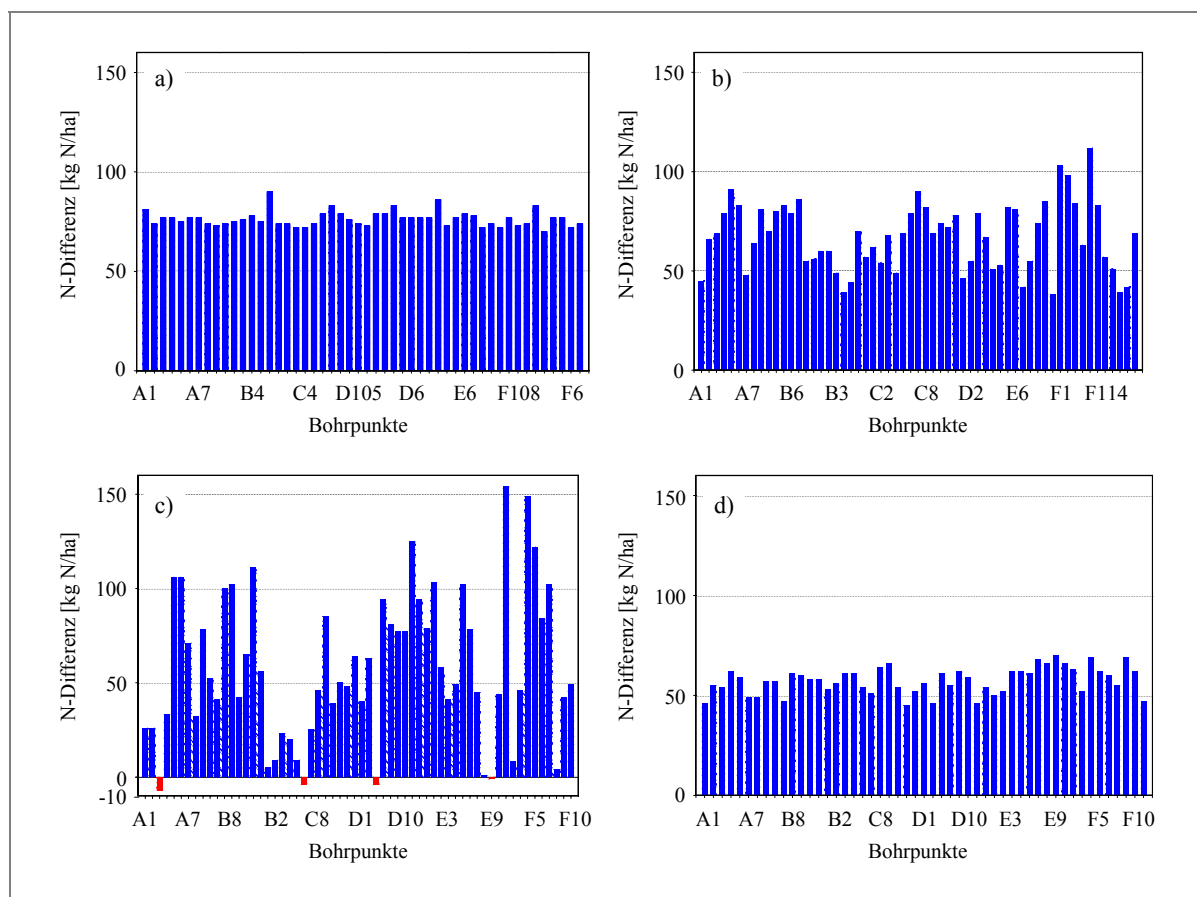
Bemerkung: \*) einheitliche Düngermenge minus Modellempfehlung bei Annahme: 1 kg N = 0.50 €,

<sup>#</sup>) flächengewichtet, WW – Winterweizen, WG – Wintergerste

Nimmt man die durchschnittliche Stickstoffmenge der Modellempfehlung für die einzelnen Schläge als Vorgabe, könnten so bei gezieltem ortsspezifischen Düngemiteleinsatz

zwischen 57 kg N/ha (Schlag *Finkenherd*) und 76 kg N/ha (Schlag *Feldscheide-links*) eingespart werden. Bei einer Annahme des Stickstofffestpreises von 500 €/t ergibt sich, bezogen auf die Schlaggröße, ein Einsparpotential von 402 € (Schlag *Kamp-Ost*) bis 1285 € (Schlag *Finkenherd*).

Betrachtet man die N-Differenzen zwischen der einheitlichen betriebsüblichen Düngung und der Düngung nach Modellempfehlung für die einzelnen Schläge so fällt auf, dass das Modell für den Schlag *Feldscheide-links* (Abb. 5.37, a), wie auch für den Schlag *Finkenherd* (Abb. 5.37, d) an allen Bohrpunkten eine ähnlich hohe Düngermenge empfiehlt. Die N-Differenzen schwanken um 20 kg N/ha (Schlag *Feldscheide-links*) bzw. 25 kg N/ha (Schlag *Finkenherd*). Diese geringe Schwankungsbreite lässt sich auf relativ geringe Texturunterschiede im Boden zurückführen, so dass diese Schläge für eine ortsspezifische Düngung als ungeeignet erscheinen. Größere Schwankungsbreiten sind dagegen auf den Schlägen *Kamp-Ost* mit 74 kg N/ha (Abb. 5.37, b), *III-3* mit 80 kg N/ha (Abb. 9.20) und *Autobahn* mit 147 kg N/ha (Abb. 5.37, c) zu finden, die deutliche Texturunterschiede aufweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass gerade auf diesen Schlägen eine ortsspezifische Düngung sinnvoll erscheint. An einigen Bohrpunkten des Schlages *Autobahn*, wie zum Beispiel *F1* oder *F5*, würde die Stickstoffgabe sogar um 150 kg N vermindert. Diese starke Verminderung hätte ebenfalls einen großen Einfluss auf den potentiellen N-Austrag.



**Abb. 5.37:** Darstellung der N-Differenz an den Bohrpunkten (einheitliche betriebsübliche Düngung minus Düngung nach Modellempfehlung) für Winterweizen auf den Schlägen: a) Feldscheide-links, b) Kamp-Ost, c) Autobahn und d) Finkenherd

In Tab. 5.18 werden die drei Varianten einheitliche und ortsspezifische Düngung nach *preagro-N* Modul sowie Düngung nach Modellempfehlung (HERMES) miteinander verglichen.

**Tab. 5.18:** Vergleich verschiedener Düngungsvarianten hinsichtlich des N-Austrags und der Nitratkonzentration im Sickerwasser über den gesamten Untersuchungszeitraum

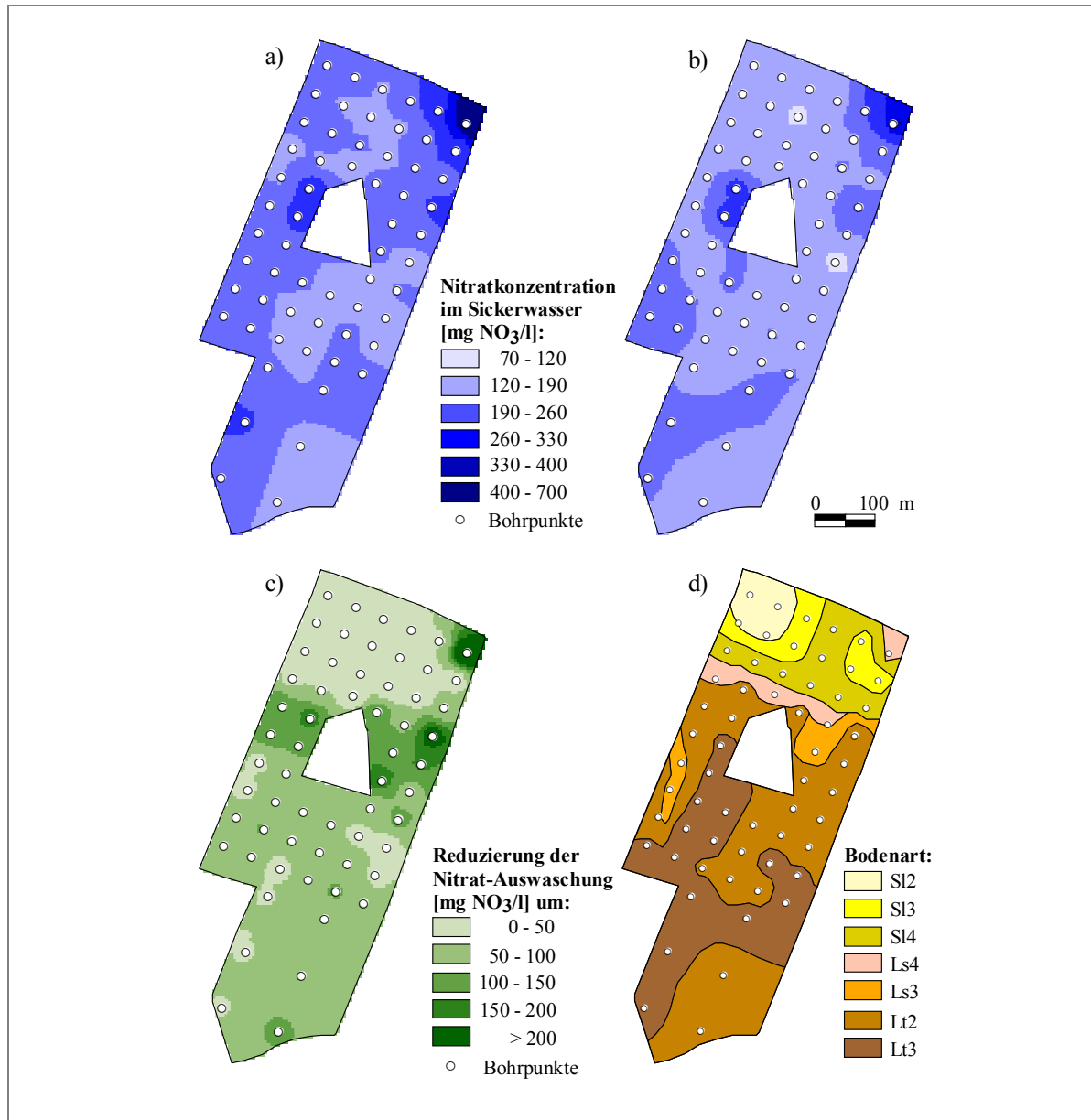
Variante	N-Austrag [kg N/ha/a]			Differenz zu 1 [kg N/ha/a]    [%]		Sickerwasser [mm/a]			Nitrat [mg/l]
	Mittel	Min	Max			Mittel	Min	Max	Mittel
<b>Feldscheide-links/Thumby (23.08.00 bis 31.03.03, n = 50)</b>									
einheitlich (1)	61	39	112			396	380	427	69
ortsspezifisch	59	39	112	-2	-3	396	380	427	67
Modell	55	39	97	-6	-8	396	380	427	62
<b>111-3/Kassow (28.10.99 bis 31.03.02, n = 116)</b>									
einheitlich (1)	72	28	113			201	159	260	160
ortsspezifisch	69	28	112	-3	-4	201	159	260	153
Modell	61	28	91	-11	-13	201	159	260	136
<b>Kamp-Ost/Groß Twülpstedt (11.11.99 bis 31.03.03, n = 59)</b>									
einheitlich (1)	28	21	65			97	65	159	129
ortsspezifisch	28	14	63	+0	+0	97	65	159	129
Modell	22	10	48	-6	-21	97	65	159	102
<b>Autobahn/Beckum (15.09.99 bis 31.03.03, n = 60)</b>									
einheitlich (1)	124	21	233			453	378	726	123
ortsspezifisch	123	21	226	-1	-1	453	378	726	122
Modell	106	19	162	-18	-15	453	378	726	105
<b>Finkenherd/Wulfen (12.09.00 bis 31.03.03, n = 51)</b>									
einheitlich (1)	54	32	91			60	41	95	403
ortsspezifisch	50	32	84	-4	-7	60	41	95	373
Modell	38	17	57	-16	-30	60	41	95	284

Die Vergleiche der einzelnen Varianten zeigen zwischen der einheitlichen und der ortsspezifischen Düngung nur eine geringe Reduzierung des N-Austrages von bis zu 7 %. Diese geringe Reduzierung resultiert aus fast gleichen Düngungshöhen bei den untersuchten Varianten. Diese Größenordnungen können aber nicht als signifikant angesehen werden, da sie im Unsicherheitsbereich liegen. Die Vergleiche zwischen einheitlicher Düngungsvariante und Düngung nach Modellempfehlung zeigen schon deutlichere Unterschiede. Hier wird der N-Austrag im Vergleich zur einheitlich gedüngten Variante um 8 - 30 % gesenkt. Darüber hinaus wird überwiegend durch Reduktionen im oberen Bereich des Düngungsspektrums erreicht, dass besonders die Maximalwerte beim N-Austrag überproportional abnehmen (14 - 37 %).

Trotz einer deutlich erkennbaren Reduzierung der Nitratkonzentration im Sickerwasser nach Modellempfehlung, liegen die Auswaschungsmengen aller Varianten über dem Trinkwassergrenzwert von 50 mg NO<sub>3</sub>/l (Trinkwasserverordnung der BRD, 1986). Die geringsten Nitratkonzentrationen sind auf Schlag *Feldscheide-links* zu finden und liegen knapp über dem Grenzwert. Für die Schläge *Kamp-Ost*, *111-3* und *Autobahn* werden Konzentrationen von > 100 mg NO<sub>3</sub>/l berechnet. Noch höhere Nitratkonzentrationen (> 250 mg/l) ergeben sich für den Schlag *Finkenherd*. Obwohl die N-Austräge auf Schlag *Finkenherd* sogar um die Hälfte kleiner sind als auf Schlag *Autobahn*, fallen die Nitratkonzentrationen aufgrund der geringen jährlichen Sickerwasserspende von 60 mm deutlich höher aus als auf Schlag *Autobahn* (453 mm/a). Für die Schläge *Autobahn* und *Finkenherd* bleibt anzumerken, dass die hohen N<sub>min</sub>-Anfangsgehalte einen großen Anteil an der Höhe der Nitratkonzentration im Sickerwasser haben. Um den Einfluss der N<sub>min</sub>-Anfangsgehalte weitgehend auszuschalten sind für die Ermittlung von Nitratkonzentrationen Langzeitsimulationen notwendig.



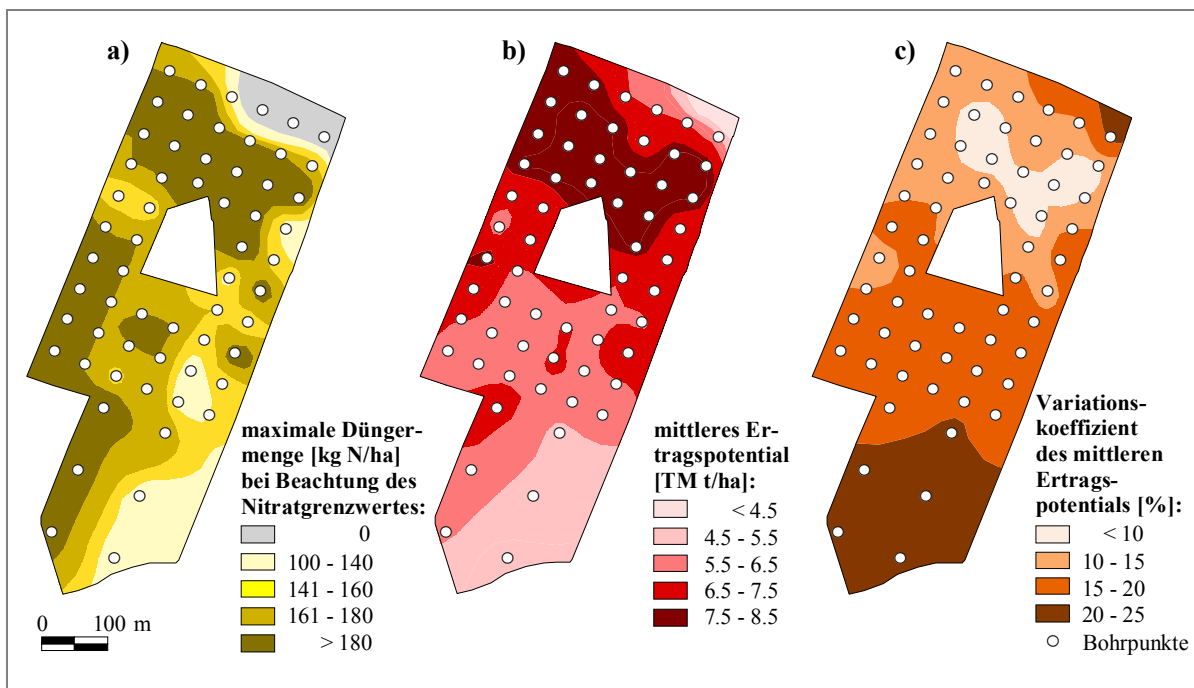
Am Beispiel des Schlags *Autobahn*, der große Texturunterschiede ausweist, soll aufgezeigt werden, wo die Reduzierung der Nitratkonzentration im Sickerwasser bei ortsspezifischer Düngung am größten ist. Verglichen werden hier die simulierten Nitratkonzentrationen im Sickerwasser für die einheitliche betriebsübliche Variante (Abb. 5.38, a) mit der Variante nach Modellempfehlung (Abb. 5.38, b) für den Zeitraum vom 15.09.99 bis 31.03.01. Die Reduzierung der Nitratauswaschung (Abb. 5.38, c) ist auf den lehmigen Sanden und den tonigen Lehmen (Abb. 5.38, d) nur gering. Im Übergangsbereich vom lehmigen Sand zum tonigen Lehm und vor allem in der vergleyten nordöstlichen Schlagecke lässt sich auf Schlag *Autobahn* die größte Nitratreduzierung erzielen.



**Abb. 5.38:** Darstellung der simulierten Nitratauswaschung nach Winterweizenanbau auf Schlag *Autobahn*: a) bei einheitlicher (betriebsüblicher) Düngung und b) bei Düngung nach Modellempfehlung (HERMES). In c) ist die Reduzierung der Nitrat-Auswaschung zwischen Modellempfehlung und einheitlicher Düngung dargestellt und d) zeigt die Karte der Bodentextur (nach Rasterbeprobung).

Für Schlag *Autobahn* wird exemplarisch eine maximal mögliche N-Düngermenge berechnet, die langfristig ein Überschreiten des kritischen Nitratgrenzwertes von 50 mg/l im Sickerwasser nicht zulässt (Abb. 5.39, a). Die Simulation erfolgte mit realen Wetterdaten der Station Beckum des Deutschen Wetterdienstes über 32 Jahre. Abb. 5.39 (b) zeigt das mittlere Ertragspotential bei maximal möglicher Düngung nach Modellrechnung. Der Variationskoeffizient des mittleren Ertragspotentials wird in Abb. 5.39 (c) bei maximal möglicher Düngung unter Berücksichtigung des Grenzwertes von 50 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$  dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die lehmigen Sande sehr ertragsstabil auf den grundwasserschonenden Anbau von Winterweizen reagieren, während auf den sandigen und tonigen Lehmen die Ertragsvariabilität deutlich ansteigt.

Die hier dargestellten Ergebnisse sind nicht ohne weiteres auf andere Schläge übertragbar. Sie müssen in weiteren Versuchen verifiziert werden, zeigen aber wo Ansatzpunkte für ein ökologisch ausgerichtetes Landwirtschaftsmanagement bestehen.



**Abb. 5.39:** Darstellung für Schlag *Autobahn*: a) die maximal mögliche N-Düngermenge, bei der der Nitratgrenzwert (50 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ ) nicht überschritten wird, b) das mittlere Ertragspotential bei optimaler N-Düngermenge und c) der Variationskoeffizient des mittleren Ertragspotentials bei maximaler N-Düngung ohne Überschreitung des Nitratgrenzwertes

## 5.5 Diskussion

### Räumliche Variabilität

Für diese Arbeit wurden Rasterdaten von fünf Schlägen aus vier verschiedenen Bodenlandschaften ausgewertet und analysiert (Kap. 5.1.1). Die Rasterbeprobung erfolgte auf den Schlägen so, dass typische Boden- und Landschaftscharakteristika zum Tragen kamen. Um die räumlichen Beziehungen zwischen den Daten zu beschreiben, wurden geostatistische Methoden (z.B. Variogrammfunktionen) angewandt. Aus dem Verlauf der Variogrammfunktionen lassen sich praktische Kenngrößen (Nugget, Range) ableiten, die Aufschluss über die Eignung der Schläge für die ortsspezifische Bewirtschaftung geben.

Entspricht bei zu starker Streuung die Semivarianz der Kernvarianz (Nugget-Effekt), bestehen keine räumlichen Zusammenhänge zwischen den Messwerten. Große Homogenitäten in der Fläche liegen vor, wenn die Distanzabhängigkeiten der untersuchten Parametern über die Feldgrenze hinausgehen. In beiden Fällen ist eine ortsspezifische Bewirtschaftung nicht sinnvoll. Diese Fälle sind aber selten. Viel öfter wurden dagegen auf den Flächen keine Strukturen erkannt, was unter anderem auch an zu groß gewählten Probenahmeabständen lag (siehe Schlag *Feldscheide-links*). Auf einigen Standorten (z.B. Wulfen) zeigten die Variogrammfunktionen bei den Bodenparametern Sand und Ton Probenahmeabstände von  $< 75$  m. Diese sehr kleinräumigen Probenahmeabständen sind in der Praxis kaum zu gewährleisten, da sie sehr kosten- und zeitaufwendig sind. Um die Kosten für eine relativ engmaschige Probenahme gering zu halten, wird nach Alternativen gesucht, die helfen, ohne großen Qualitätsverlust den Probenahmeaufwand zu vermindern. Verwendet werden oft Bodeneigenschaften, die hochaufgelöst von der Fläche vorhanden sind oder ohne großen Kostenaufwand vor Ort erfasst werden können und mit dem zu untersuchenden Parameter räumlich korrelieren.

Arbeiten von SOMMER et al. (2001), DALGAARD & HAVE (2001) und DOMSCH & GIEBEL (2001) verweisen auf eine hohe Korrelation zwischen dem Signal der elektrischen Leitfähigkeit (EC) und dem Tongehalt. Auf dem Schlag *Autobahn* lässt sich eine hohe Korrelation ( $r^2 = 0.813$ ) zwischen EC-Signal und Tongehalt nachweisen, die die Nutzung der EM38-Messung für eine verbesserte räumliche Vorhersage des Tongehalts auf der Fläche erlaubt. Ausschlaggebend für die hohe Korrelation scheint auf diesem Schlag die hohe Spannweite bei den Tongehalten zu sein. Demgegenüber zeigen die Schläge *Feldscheide-links*, *111-3* und *Kamp-Ost* bei den Tongehalten keine derartigen Beziehungen. Die Gründe dafür liegen auf den Schlägen *Feldscheide-links* und *111-3* in der geringen Differenzierung der Tongehalte, so dass lokale Variationen bei Feuchte und Temperatur die Unterschiede häufig kompensieren (HERBST, 2002). Auf Schlag *Kamp-Ost* reagiert das Messsignal der elektrischen Leitfähigkeit eher auf die hohen Grundwasserstände und das Haftwasser als auf die Tongehalte im Bodenprofil, weil die EC-Messung im Frühjahr (09.04.99) nach der Auffüllung des Wasserspeichers statt fand. Nachteilig erscheint auch, dass die Tonverteilung im Profil durch das Messsignal nur integrativ (über 15 dm Tiefe) bestimmt wird. Schichtungen im Boden können ebenfalls nicht aus dem EC-Signal abgeleitet werden.

Die räumlichen Strukturen der Wassergehalte und des mineralischen Stickstoffs sind nicht statisch. In Abhängigkeit von der witterungsbedingten Wasserhaushaltsbilanz ändert sich die räumliche Verteilung von Jahr zu Jahr. Bei den  $N_{\min}$ -Werten führt eine starke Auswaschung im Boden zum Verschwinden der räumlichen Unterschiede, während mittlere Klimabedingungen eher zu einer Differenzierung und Trockenjahre wiederum zur Angleichung der Unterschiede zwischen räumlichen Einheiten führen (STOCK, 1995). Diese Aussagen bestätigen die  $N_{\min}$ -Werte von Schlag *Autobahn*. Im Trockenjahr 1999 gleichen sich die  $N_{\min}$ -Werte an, während im sehr feuchten Frühjahr 2000 durch Auswaschung die räumlichen Unterschiede fast verschwinden und im Sommer 2000 dann wieder deutlicher differenzieren.

Für den mineralischen Stickstoff lässt sich auf den Untersuchungsschlägen keine Änderung der räumlichen Variabilität zwischen den einzelnen Düngungsvarianten (einheitlich und ortsspezifisch) feststellen. Der Grund dafür liegt zum einen in den zu geringen Unterschieden zwischen den N-Düngergaben der einzelnen Varianten wie auch in der Höhe der Düngungsbemessung begründet. Die N-Gaben liegen deutlich oberhalb des Punktes, an dem der Ertragszuwachs pro eingesetztem Kilogramm Stickstoff abflacht. Ertragsdepressionen sind bei diesen N-Gaben nicht zu erwarten.

### Ertragskartierung

Die Erfassung der Erträge durch Mähdrescher stellt immer eine Integration des Ertrags über die Schnittbreite dar. Die Nutzung von Ertragskarten für die Vorhersage von Mustern im Boden setzt somit eine intensive Beurteilung der technischen, wie auch der operationellen Störgrößen voraus (JÜRSCHIK et al., 1999; DOBERS, 2002; MUHR & NOACK, 2002 und RAIMER, 2003). Die Kontrolle kann durch automatische Programme (H-Methode, NOACK et al., 2001) oder teilautomatisiert durch visuelle Kontrolle im GIS erfolgen. In den meisten Fällen sind keine stabilen Ertragszonen erkennbar, da die Ertragsstrukturen jährlich schwanken. Diese Schwankungen werden durch komplexe Relief-Boden-Klima-Interaktionen hervorgerufen (PENNOCK & ANDERSON, 1992).

Beziehungen zu statischen Parametern der Bodenfruchtbarkeit sind demnach erst nach Auswertung von mehreren qualitativ gut kalibrierten und fehlerbereinigten Ertragskarten zu erwarten (AUERNHAMMER & DEMMEL, 1993). Nur in Ausnahmefällen ergeben sich schon eindeutige Zuordnungen zu Bodenmustern aus einjährigen Ertragskarten (JÜRSCHIK & SCHMERLER, 1995; LAMP et al. 1998; REIMER & LAMP, 2002). Einer dieser Ausnahmefälle ist der Schlag *Finkenherd*, auf dem eindeutig Wasser der ertragslimitierende Faktor ist. Die Areale mit höheren Tongehalten können aufgrund ihrer höheren Wasserspeicherkapazität die Pflanzenbestände länger mit Wasser versorgen, während auf den leichteren Stand-orten schon Trockenstress die Pflanzenentwicklung hemmt. In diesen Fällen eignen sich die Ertragskarten gut für die Erkennung von Bodenmerkmalen.

In Gebieten mit einer deutlich positiveren Wasserbilanz, wie Schlag *Autobahn*, prägen sich Texturgrenzen dagegen nur schwach durch. Die Gründe dafür sind vielschichtig. So können Texturgrenzen durch verdichtete Areale (Vorgewende) überlagert, wie auch durch räumlich anders verteilte Größen (z.B. Steingehalt) überprägt werden. Diese Areale zeigen dann ganz unterschiedliche Reaktionen bei gleichen Witterungsabläufen. Aus den Ergebnissen von drei bis vier aufeinander folgenden Ertragsjahren lassen sich auf den Schlägen *Kamp-Ost* und *Autobahn* wiederkehrende Ertragsmuster ablesen.

Grundsätzlich lässt sich feststellen: Je mehr Ertragskarten in die Auswertung einfließen, desto geringer ist der jährliche Zufallseffekt der Einzelkarte zu gewichten und je größer ist die Ertragssicherheit der ausgewiesenen Zonen.

Die Ergebnisse der Ertragszonierung auf den Schlägen *Feldscheide-links*, *Kamp-Ost* und *Autobahn* zeigen häufig Ertragsdepressionen in Randbereichen. In diesen Bereichen kommt es durch Mehrfachüberfahrten (beim Wenden) zu Verdichtungen im Boden. METTE (1994) weist für derartige Areale Ertragsseinbußen von bis zu 25 % aus. Auf Schlag *Autobahn* lassen sich stellenweise sogar Einbußen von 30 % nachweisen, im Durchschnitt sind es ca. 16 %. Aber nicht nur Verdichtungen im Boden sondern auch die Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe beeinflussen das Ertragsverhalten der Kulturpflanzen (REIF et al., 1984). Ein Beispiel dafür zeigt wiederum der Schlag *Autobahn* mit der ringförmigen Niederertragszone um das mittig gelegene Waldgebiet (siehe Abb. 5.13, c).

### Modell HERMES

Durch den Einsatz des N-Modells HERMES können die wesentlichen Prozesse der Stickstoffdynamik (N-Mineralisierung, Denitrifikation und N-Auswaschung) eindimensional abgebildet werden. Mit Berücksichtigung des Bewirtschaftungsmanagements, des Witterungsverlaufes sowie der Bodeneigenschaften besteht die Möglichkeit, standortspezifische Aussagen (u.a. zum  $N_{\min}$ -Gehalt, zum Kornertrag und zum Sickerwasser) zu treffen.

Der Simulation der Wasserbewegung im Boden kommt eine große Bedeutung zu, da darauf aufbauend der N-Transport, N-Aufnahme und die Pflanzenentwicklung erfolgen. Lagerungsdichte und Steingehalt beeinflussen je nach Bodenart die nFK im Boden unterschiedlich stark. Da sie für das Modell HERMES nur abgeschätzt werden, bergen sie ein großes Fehlerpotential. Eine Optimierung der nFK dieser abgeschätzten Größen wie auch des Grundwasserflurabstandes und der effektiven Durchwurzelungstiefe hatte zur Folge, dass beim Wasser- und  $N_{\min}$ -Gehalt sowie beim Ertrag deutlich höhere Korrelationen erreicht wurden, die auch in den Folgejahren Bestand hatten.

Die gemessenen und die simulierten Erträge weisen auf den untersuchten Schlägen Differenzen auf. Die gemessenen Ertragsdaten der Mähdrescher stellen einen Mittelwert über die Schnittbreite und die zurückgelegte Wegstrecke dar. Ein Vergleich mit den simulierten Punkterträgen zeigt nur geringe Übereinstimmungen. Mittelt man hingegen die Ertragswerte im Umkreis von 10 m um jeden Bohrpunkt und bezieht auch die Standardabweichung (als Maß für die Ertragsvariabilität) am Bohrpunkt mit ein, befinden sich rund 75 % aller simulierten Erträge in diesem Variationsbereich. Im Durchschnitt über alle Ertragskarten liegt die Standardabweichung im 10 m Radius um den Bohrpunkt bei  $\sim 0.5$  t/ha. Auf den Schlägen *Autobahn* und *Kamp-Ost* werden stellenweise aber auch Abweichungen von 2 - 3 t/ha festgestellt. Diese hohen Schwankungen sind Hinweise auf Lager(-getreide), Schädlingsbefall oder fehlerhafte Messungen. Da vom Lager in der Regel sehr gut entwickelte Pflanzenbestände betroffen sind, ergeben sich hier besonders große Abweichungen zur Simulation.

Die Unter- wie auch Überschätzung von Erträgen führt zu fehlerhaften Eingangswerten für die weiterführende Simulationsrechnung, da das Modell jeweils aus dem Kornertrag der Vorfrucht die Menge an Pflanzenrückständen berechnet, die auf dem Schlag zurückbleiben.

Für die Anwendung des Modells zur Simulation der N-Dynamik im Boden unter landwirtschaftlichen Praxisbedingungen bedeutet das:

- Der Stickstoffhaushalt unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren.
- Auf einen Punkt bezogene Simulationsergebnisse stellen daher keine genügende Grundlage für eine umweltgerechte schlagbezogene Düngungsempfehlung dar. Daraus ergibt sich eine notwendige Unterteilung der Schläge in Teilschläge, die hinsichtlich der N-Dynamik homogene Areale darstellen.
- Die Beschreibung der Stickstoffdynamik im Boden über einen längeren Zeitraum (mehrere Vegetationsperioden) anhand von Simulationsrechnungen erfordert genaue Angaben zu den eingesetzten Düngemitteln, den Ernteprodukten sowie den Ernterückständen. Die für die Simulationsrechnung benötigten bodenphysikalischen Kennwerte sind durch Messungen zu erfassen, was einen hohen praktischen Aufwand bedeutet.
- Das Modell kann als zeitweiliger Ersatz für  $N_{\min}$ -Messungen auf allen Untersuchungsschlägen empfohlen werden und eine aufwendige Beprobung im Frühjahr ersetzen.
- Unter Einbeziehung der räumlichen Variabilität bodenphysikalischer Kennwerte und der Ausgangsbedingungen zum Gehalt an mineralischem Stickstoff und umsetzbarem Kohlenstoff lassen sich mit Simulationsrechnungen die Intensität und Richtung der

Umsatzprozesse des Bodens hinsichtlich Stickstoffmineralisierung, N-Verlagerung mit dem Sickerwasser und Denitrifikation darstellen.

Die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen  $N_{\min}$ -Gehalten resultiert aus:

- nicht modellierten Einflussfaktoren (u.a. laterale Zuflüsse, Lagergetreide, Schädlingsbefall),
- fehlerbehafteten Eingangsgrößen (z.B. Ausbringungsfehler bei der N-Düngung, Entfernung des Schlages zur Wetterstation) und mangelnder Datengrundlage (fehlerhaft abgeschätzte N-Gehalte bei der organischen Düngung) sowie
- Modellfehlern, die durch die vereinfachte Beschreibung von Prozessen erfolgt (z.B. Kapazitätsansatz).

D.h., der  $N_{\min}$ -Wert schließt sämtliche Einflussgrößen aus Bewirtschaftung, Witterung und Bodeneigenschaften in sich ein. Diese lassen sich jedoch in ihrer standortspezifischen Wirkung nicht genau charakterisieren.

### Vergleich unterschiedlicher Datengrundlagen

Im Forschungsprojekt *preagro* dient die Reichsbodenschätzung neben der digitalen Hofbodenkarte als bodenkundliche Grundlage für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie die N-Düngung. Diese Arbeit zeigt, dass die räumlichen (Klassengrenzen) und die punktuellen (Grablochbeschriebe) Basisdaten der Reichsbodenschätzung auf den untersuchten Schlägen nicht den Ansprüchen der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung genügen.

Das liegt daran, dass die Grablochbeschriebe nicht der heute gültigen Bodennomenklatur entsprechen und erst mit dem Programm BOSSA\_SH (REICHE, 1998) umgewandelt werden müssen. Dabei kommt es oft zu Anpassungsfehlern (HERBST & LAMP, 2002). So können Schluffgehalte nur indirekt aus der Entstehung abgeschätzt werden, nicht aber direkt aus den Gefügedaten, weil Schluff als Bodenart in der Reichsbodenschätzung nicht berücksichtigt wurde. Dies führt zu Abweichungen bei der Abschätzung der nFK. Zum anderen zeigen die Vergleiche mit eigenen Bohrungen bei den Grundwasserflurabständen erhebliche Ungenauigkeiten, die zu Fehlern bei der Hydromorphie führen. (Ursache: spätere Drainierung der Schläge.) Oft hat sich zwischen der Ansprache bei Reichsbodenschätzung und der heutigen ein Nutzungswandel vollzogen, wie das auf dem Schlag *Autobahn* zu beobachten ist.

Die digitalen Hofbodenkarten der Untersuchungsschläge zeigen eine räumlich viel differenziertere Flächenausweisung als bei der Reichsbodenschätzung. Die abgeschätzten Bodenparameter (Textur, Humus, Steingehalt) stehen dagegen in großer Diskrepanz zu den Analysen aus der Rasterbeprobung. Die Abschätzung der Humusgehalte nach BLUME & HELSPER (1987) aus dem Farbwert heraus, wie auch die Unterteilung der Steingehalte nach KA4 (AG BODEN, 1994) erscheinen zu ungenau für die Nutzung bei der ortsspezifischen Bewirtschaftung zu sein. In ersten Fall ist eine Überprüfung der visuellen Ansprache durch C/N-Analysen ratsam. Im zweiten Fall sollte die sechsklassige Nomenklatur weiter unterteilt werden. Empfehlenswert wäre eine Klassifizierung in 5 % oder 10 % Schritten, die aber praktisch nicht durchführbar ist. Die Sensibilitätsanalyse (Kap. 5.2) zeigt, wie sich schon geringe Abweichungen bei den Bodengrößen Textur, Humus oder Steingehalt auf den simulierten Ertrag auswirken können.

Ein Versuch, die Basisdaten der Reichsbodenschätzung und der Hofbodenkarte mit Hilfe von  $C_{org}$ -Mittelwerten aus der Rasterbeprobung für die einzelnen Bodenareale zu aktualisieren, brachte keine wesentliche Verbesserung bei der Simulation.

Daraus folgt, dass die kleinräumige Erfassung der Variabilität eine wichtige Grundlage für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung wie auch für die Düngungsempfehlung darstellen. Dem gegenüber steht die Applikationstechnik. Diese bestimmt weitgehend über die Arbeitsbreite auch die Größe der Management-Units. Die Arbeitsbreiten liegen heute bei 24, 36 oder 48 m. D.h., dass mit zunehmender Arbeitsbreite auch die Management-Units wachsen, gleichzeitig aber die Präzision bei der Ausbringung in der Fläche abnimmt. Mit der heute zur Verfügung stehenden DGPS-Technik (z.B. Flüssigdüngung mit Auslegerspritze) ist eine Ausweisung von 10 - 1000 m<sup>2</sup> Units möglich (allgemeine Herstellerinformationen).

Praxisüblich sind derzeit eher Management-Units von > 1000 m<sup>2</sup>. Das liegt daran, dass in der Praxis immer noch einfachste GPS-Systeme und Schleuderdüngerstreuer dominieren. Letztere zeigen eine schlechte Differenzierungsmöglichkeit quer zur Fahrspur. Dazu kommt ein ungünstigeres Streubild mit zunehmender Wurfweite (WELTZIN et al., 2002). Deutlich besser für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung sind Auslegerdüngerstreuer geeignet. Diese Geräte können quer zur Fahrspur durch gezielte Teilbreitenabschaltung Düngemittel präzise auf der Fläche ausbringen als Schleuderdüngerstreuer. So muss für jede Fläche ein Kompromiss zwischen Gerätetyp, Arbeitsbreite und der geforderten Verteilgenauigkeit eingegangen werden.

### Szenariorechnung

Beim Einsatz des *preagro-N* Moduls über drei Vegetationsperioden (2000 bis 2002) ergibt sich ein Einsparpotential gegenüber der einheitlichen Stickstoffdüngung von durchschnittlich 4 %. Erfolgt die teilflächenspezifische Düngung nach der Modellempfehlung von HERMES, würde die applizierte Stickstoffmenge gegenüber der einheitlichen Düngungsvariante um durchschnittlich 18 % verringert. Die reale Überprüfung dieser Werte steht auf den *preagro*-Flächen noch aus. Für das Projekt MOSAIK, das ebenfalls das N-Modell HERMES für die N-Düngungsempfehlung benutzt, zeigen die mehrjährigen Ergebnisse ein Einsparpotential von durchschnittlich 40 kg N/ha gegenüber der konventionellen Methode (KERSEBAUM et al., 2003).

Die Simulationsrechnungen der Untersuchungsschläge zeigen, dass Einsparpotential bei der N-Düngung vorhanden ist. Die Nutzung dieses Potentials wird aber durch Faktoren, wie den kritischen Stickstoffgehalt in der Pflanze oder den fest vorgegebenen Proteingehalt eingeschränkt.

Die berechnete Nitratkonzentration im Sickerwasser liegt auf allen Untersuchungsstandorten über dem Trinkwassergrenzwert von 50 mg NO<sub>3</sub>/l. Mit Ausnahme des Schlages *Feldscheidelinks* ist infolge der N-Übersorgung der vorangegangenen Jahre und Jahrzehnte ein großes N-Mineralisationspotential im Boden angehäuft worden, das die Nitratauswaschung von der aktuellen Höhe der N-Düngung praktisch unabhängig macht (BACH, 1987). Neben Klimafaktoren mit jahreszeitlicher Schwankung, wie Bodentemperatur und Wasserhaushalt, wirken sich auch bestimmte Bewirtschaftungsfaktoren, wie N-Düngung, Fruchtfolge oder Bodenbearbeitungsmaßnahmen, nachhaltig auf den Nitratgehalt im Boden aus (KURZER, 1999). Eine Reduzierung der Nitratausträge über Winter wäre durch den gezielten Einbau von Zwischenfrüchten in der Fruchtfolge möglich (BERGER, 1992).

Die intensive ackerbauliche Nutzung führt zu positiven N-Salden und erhöhten Nitratreinträgen ins Grundwasser, die zu Problemen bei der Trinkwassergewinnung führen können.

Als Kontrollmaßnahme werden häufig  $N_{\min}$ -Untersuchungen bis 10 dm Tiefe herangezogen. Auf dränierten Schlägen kann die so ermittelte N-Fracht als die Menge angesehen werden, die ins Oberflächenwasser abgeführt wird. Auf tief durchwurzelten Lössböden mit relativ trockenem Klima, wie Schlag *Finkenherd*, führt dieser Wert aber zu Fehlinterpretationen. Wie Untersuchungen von RENGGER & STREBEL (1980) und SAUER et al. (2002) zeigen, sind effektive Durchwurzelungstiefen von 15 - 22 dm für Wintergetreide auf Lößstandorten keine Seltenheit. D.h., in Trockengebieten werden die hohen vorhandenen Nitratgehalte in tiefgründig durchwurzelten Lössböden nur zu einem geringen Teil aus dem Wurzelraum verlagert, da die Pflanzenwurzeln Nitrat im Unterboden über mehrere Jahre erreichen und abschöpfen können (STREBEL & DUYNISVELD, 1989). Dies ist zum einen dadurch bedingt, dass die Pflanzen in Löss sehr tief wurzeln und zum anderen ist die Vordringgeschwindigkeit des Sickerwassers in Böden mit hoher Feldkapazität und geringer Niederschlagshöhe sehr gering. Dadurch braucht das Sickerwasser mehr als ein Jahr, um den Einflussbereich der Wurzeln (Evapotranspirationszone) zu verlassen. Auf tiefgründigen Böden scheint die Tiefenbeprobung ein probates Kontrollinstrument zur Aufdeckung von Nitratbelastungen aus der Vorbewirtschaftung und zur Abschätzung der Sickerwasserverlagerung darzustellen.

Über Simulationsrechnungen besteht die Möglichkeit für die einzelnen Teilflächen (Areale) eine maximal mögliche N-Düngung zu berechnen, die eine Überschreitung des Nitratgrenzwertes unterbindet. Das scheint aus ökologischer Sicht sinnvoll, bedeutet aber für den Landwirt, dass er auf einigen oder sogar auf allen Schlagteilen nicht das volle Ertragspotential nutzen kann. Mindererträge wären die Folge. Erwähnt sei hier, dass nicht die Nitratkonzentration eines Jahres maßgeblich ist, sondern eine langjährige Betrachtung notwendig erscheint.

An dieser Stelle ist die Politik gefordert, verbindliche Qualitätsstandards vorzugeben. So könnten Landwirte steuerlich stärker belastet werden (z.B. über eine gestaffelte Grundsteuer), wenn die Nitratkonzentration im Sickerwasser dauerhaft über dem vorgeschriebenen Grenzwert liegt. Die Vorstellung, dass Ertragseinbußen über Ausgleichszahlungen abgegolten werden, wenn bestimmte Produktionsrichtlinien (z.B. reduzierter N-Düngemiteinsatz) eingehalten werden, scheinen dagegen nicht mit dem Bodenschutzgesetz vereinbar. Realistischer erscheint da, dass die so erwirtschafteten Produkte unter einem speziellen Umwelt-Logo hochpreisiger vermarktet werden.



## 6 Zusammenfassung

Die hier vorliegende Arbeit entstand aus dem Teilprojekt „Lokaler N-Austrag“ des BMBF geförderten Verbundprojekts *preagro*, das anhand deutschlandweiter Pilotflächen ein Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau entwickelt. Die Aufgabe dieses Teilprojekts war verschiedene Düngungsstrategien im Rahmen der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Hinblick auf die Auswaschung von Stickstoff mit dem Sickerwasser zu untersuchen. Auf fünf ackerbaulich genutzten Schlägen in verschiedenen Bodenregionen Deutschlands wurden räumliche und zeitliche Untersuchungen zur vertikalen und horizontalen Mineralstickstoffverteilung durchgeführt. Die Daten wurden ebenfalls für die Validierung der N-Dynamik im Simulationsmodell HERMES benutzt. Die Beprobung erfolgte als Rasterbeprobung (Rasterabstände: 34 bis 96 m) bis 9 dm Tiefe jeweils im Frühjahr zu Vegetationsbeginn bzw. im Herbst nach der Ernte. Zusätzlich wurde an ausgewählten Stellen, sogenannten Nestern (Rasterabstände: 5 bis 6 m), bis 30 dm Tiefe beprobt. Die Tiefenbeprobung erfolgte jeweils zum Projektbeginn (1999) und zum Projektende (2002). Zu Untersuchungsbeginn wurden die Schläge in eine einheitliche gedüngte und eine ortsspezifische gedüngte Fläche unterteilt.

Im Rahmen dieser Arbeit ergaben sich folgende Ergebnisse:

1. Für die Charakterisierung der räumlichen Struktur von Bodeneigenschaften und Nährstoffen eignen sich geostatistische Verfahren, wie die Variogrammanalyse. Die Ergebnisse für die Bodenzustandsgrößen Ton, Sand, organischer Kohlenstoff, mineralischer Stickstoff und volumetrischer Wassergehalt zeigten unterschiedlich große räumliche Variabilitäten auf den Untersuchungsstandorten. Dabei kristallisierten sich für einzelne Standorte bevorzugte Variogrammfunktionen heraus. Die verschiedenen Bodenlandschaften unterscheiden sich stark voneinander. Auch bei gleichartigen Standorttypen gibt es große räumliche Unterschiede, wie die Jungmoränengebiete um Thumby und Kassow zeigen. Daraus folgt, dass eine generelle Validierung der Standorttypen nicht ausreicht, sondern für jeden Standort spezifisch erfolgen sollte.
2. Durch die Unterteilung des Gesamtschlags in Areale gleicher Bodenartenhauptgruppen lässt sich bei den volumetrischen Wassergehalten die Variabilität im Schlag lokal verringern. Im Gegensatz dazu ist dieses Verfahren für die Eingrenzung der räumlichen Verteilung des mineralischen Stickstoffs und des Ertrags ungeeignet. Eine Ausnahme beim Ertrag bilden Standorte mit einer jährlichen Wasserbilanz  $< 200$  mm. Es konnte gezeigt werden, dass die räumliche Verteilung des  $N_{\min}$ -Gehalts im Boden wie auch des Ertrages stärker durch Umwelteinflüsse (z.B. Starkregen) und Managementmaßnahmen beeinflusst werden als durch die Bodenart. Die räumlichen Strukturen, die mittels Semivarianzanalyse identifiziert werden, unterliegen dabei zeitlichen Veränderungen. So ließen sich bei den dynamischen Bodenzustandsgrößen volumetrischer Wassergehalt und mineralischer Stickstoff saisonale Schwankungen nachweisen. Neben der zeitlichen Variabilität zeigten die  $N_{\min}$ -Werte auf allen Standorten eine Abnahme bei der räumlichen Verteilung mit der Tiefe. Ein Grund dafür ist, dass sich auf den Schlägen, Pflanzenrückstände sehr heterogen verteilen. Die unterschiedlich schnell ablaufenden Umsetzungsprozesse bei den Rückständen (Mineralisation) führt zu einer großen Variabilität in der obersten Bodenschicht (0 - 3 dm). In den tieferen Bodenschichten (3 - 9 dm) beeinflussen die  $N_{\min}$ -Gehalte eher Verlagerungsprozesse und Diffusionsvorgänge. Die Ergebnisse der Nesterbeprobungen auf Schlag *Autobahn* zum Wassergehalt ist zu entnehmen, dass z.B. rund 50 % der Gesamtvariabilität der Teilfläche Sand schon im 5 x 5 m Bereich zu

finden ist. Die  $N_{\min}$ -Gehalte der selben Fläche zeigen dagegen im 5 m Bereich sogar eine deutlich höhere Variabilität als die Teilfläche.

3. Schläge mit einer hohen Spannweite beim Tongehalt, wie der Schlag *Autobahn*, zeigen eine hohe Korrelation zwischen Tongehalt und EC-Signal, die für eine verbesserte räumliche Aussage bei der Tonverteilung (*Co-Kriging*) genutzt werden kann. Bei geringen Tongehalten bzw. einer geringen Schwankungsbreite beim Tongehalt (z.B. Schlag *Feldscheide-links* und Schlag *111-3*) eignen sich EC-Messungen nicht für räumliche Aussagen zur Tonverteilung, da die Variationsbreite der EC-Werte zu klein ausfällt. Anhand der Auswertung der EC-Werte von Schlag *Kamp-Ost* kann geschlussfolgert werden, dass EC-Messungen einheitlich im Spätsommer durchgeführt werden sollten, um den Einfluss von Haft- und Staunässe sowie von Grundwasser im Bodenprofil auf das Messsignal zu minimieren.
4. Die räumlichen Muster von Ertragskarten werden stark vom Witterungsverlauf und Managementmaßnahmen beeinflusst. Durch die Auswertung von mehreren aufeinander folgenden Ertragskarten, können Einflüsse aus der Witterung und der Bewirtschaftung weitgehend minimiert werden. Die Ertragszonierung bietet eine zusätzliche Entscheidungshilfe für die ortsspezifische Bewirtschaftung (z.B. Düngung). Einen Sonderfall stellt Schlag *Finkenherd* dar. Auf diesem Schlag führt länger anhaltender Wassermangel während der Vegetationsperiode zu einer erhöhten Stabilität bei den Ertragsmustern, da die Wasserversorgung für das Wachstum von entscheidender Bedeutung ist. Unter diesen Bedingungen prägen sich Texturunterschiede sehr deutlich in der Ertragskarte durch.
5. Mit Hilfe des N-Modells HERMES wurden Simulationsrechnungen zur Stickstoffdynamik im Boden, zum Wassergehalt und zum Ertrag durchgeführt. Die Überprüfung der simulierten Werte erfolgte über den Untersuchungszeitraum von 1999 bis 2002 anhand von Zeitreihenmessungen an Rasterpunkten. Erst durch eine Optimierung der nutzbaren Feldkapazität über die visuell abgeschätzten Bodeneigenschaften (Lagerungsdichte, Steingehalt, Durchwurzelungstiefe und Grundwasserflurabstand) konnte eine hohe Korrelation zwischen Messung und Simulation bei den volumetrischen Wassergehalten auf allen Untersuchungsschlägen erreicht werden. Die simulierten Ertragsdaten zeigten ebenfalls auf allen Schlägen eine gute Anpassung an die gemittelten Ertragswerte im Umkreis von 10 m um den Rasterpunkt. Weniger als 25 % der simulierten Erträge zeigten eine Abweichung am Rasterpunkt um mehr als eine Standardabweichung vom Rohertrag. Bei den  $N_{\min}$ -Gehalten ist die Anpassung weniger befriedigend ( $r^2 < 0.275$ ). Bei sehr homogener N-Verteilung lassen sich kaum Korrelationen zwischen Messung und Simulation finden, da eine große Streuung in den Daten fehlt.
6. Bodeninformationen liegen in Deutschland flächendeckend meist nur in Form der Reichsbodenschätzung als klein- bis mittelmaßstäbliche Bodenkarten oder teilweise schon als digitale Hofbodenkarte (mittelmaßstäblich) vor. Vergleiche mit Daten aus Bodenuntersuchungen (großmaßstäblich) zeigten deutliche Informationsverluste mit zunehmend kleinmaßstäblicher Skalierung. Die zeitliche Dynamik des Mineralstickstoffgehaltes in der Wurzelzone sowie die räumlichen Muster der Erträge gewannen deutlich an Kontur und Aussagekraft, wenn relativ hochaufgelöste Messdaten verwendet wurden. Die Übereinstimmung der räumlichen Ertragsmuster von Messung und Simulation nahm ab, wenn Standardinformationen (z.B. aus der Reichsbodenschätzung) verwendet wurden, da häufig lokale prozessrelevante Standorteigenschaften unberücksichtigt blieben. Die unterschiedlichen Bodeninformationen führen dementsprechend zu Differenzen bei der Düngeempfehlung. Dies kann lokal zu Diskrepanzen zwischen N-Angebot und N-

Bedarf bei den Pflanzen führen. Eine genaue Erfassung der Flächenvariabilität hilft bei der ortsspezifischen Düngung Kosten zu sparen und Stoffausträge (N-Austrag) zu vermindern. Die Simulationsszenarien zeigten, dass die beobachteten Unterschiede zwischen einheitlich und ortsspezifisch gedüngter Schlaghälfte häufig auf eine unterschiedliche Standortzusammensetzung zurückzuführen sind.

7. Die Vergleiche zwischen einheitlicher und ortsspezifischer Düngungsvariante zeigten auf den fünf Untersuchungsschlägen unter Verwendung des *preagro-N* Moduls (reale Bewirtschaftung) nur ein geringes bis gar kein Einsparpotential bei der Stickstoffdüngung. In zwei Fällen (Schlag *Autobahn* und *Feldscheide-links*) lag die N-Aufwandsmenge der ortsspezifischen Variante sogar über der Empfehlung der einheitlichen Variante. Im Falle des Schlages *Autobahn* führte die erhöhte N-Düngung auf der ortsspezifischen Variante (+19 kg N/ha) zu einer messbaren Ertragssteigerung von 0.5 t TM/ha. Auf den restlichen Schlägen ergaben sich keine Ertragsunterschiede zwischen den einzelnen Varianten. Die Unterschiede bei den  $N_{\min}$ -Residuen nach der Ernte lassen sich auf die veränderte Düngermenge der einzelnen Varianten zurückführen. Signifikante Unterschiede zwischen einheitlicher und ortsspezifischer Düngung waren weder beim Ertrag noch bei den  $N_{\min}$ -Werten am Erntetag auf den Untersuchungsschlägen nachweisbar. Die Analysen der Ergebnisse zeigten, dass die vom Modell empfohlenen N-Düngermengen wie auch die reale N-Düngung zu hoch bemessen waren. Die Ertragskurve bestätigt, dass die empfohlenen und realen N-Mengen deutlich oberhalb des Punktes liegen, an dem pro eingesetztem Kilogramm Stickstoff der Ertragszuwachs signifikant abflacht. Die Ursache hierfür liegt darin, dass bei der Berechnung der Düngungsempfehlung ein festes Proteinziel bei der Korntrockenmasse vorgegeben wird, so dass bei geringerer Düngung zunächst der Proteingehalt im Korn sinkt, bevor das Modell mit einem Ertragsabfall reagiert. Des Weiteren wird bei der Simulation ein gewisser Sicherheitsabstand zum kritischen N-Gehalt in der Pflanze ( $N_{\text{krit}}$ ) eingehalten, unterhalb dessen es zu einer Wachstumsdepression kommt. Hier wird der Unsicherheit der prognostizierten Simulation sowie der des Modells selbst Rechnung getragen.
8. Der Nitratgrenzwert von 50 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$  wird auf allen fünf Untersuchungsschlägen unter einheitlicher als auch unter ortsspezifischer Düngung z.T. deutlich überschritten. Aus ökologischer und auch ökonomischer Sicht ist die Einhaltung des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung ein wichtiges Ziel. Daher sollte das Ziel der ortsspezifischen Bewirtschaftung sein, für die einzelnen Flächenareale eine maximal mögliche Düngermenge festzulegen, die eine Überschreitung des Nitratgrenzwertes vermeidet. Dies würde in den meisten Fällen aber Ertragseinbußen für die Landwirte bedeuten. Im Falle des Schlages *Autobahn* würde dies zu mittleren Ertragseinbußen auf den lehmigen Sanden von 10 - 15 %, auf den sandigen Lehmen von 15 - 20 % und auf den tonigen Lehmen von 20 - 25 % führen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die ortsspezifische Bewirtschaftung ein wichtiger Schritt in Richtung Qualitätssicherung und Ressourcenschutz in der Landwirtschaft ist. Auf Sicht der für 2005 anstehenden Veränderungen (EU-Verordnung), die eine Rückverfolgbarkeit aller Lebens- und Futtermittel fordert, stellt die Teilflächenbewirtschaftung eine innovative Managementmethode dar.

## Summary

The joint research project *preagro*, sponsored by the BMBF, develops management systems for site-specific agriculture on German pilot fields. This work is a subpart of the project *preagro*, looking at local nitrogen leaching processes. The task for this subproject was the investigation of different fertilization strategies under site-specific management. The focus has been the nitrogen leaching into the groundwater. The distribution of the vertical and horizontal soil mineral nitrogen patterns on five fields were investigated in different regions in Germany. Additionally these data were used for the validation of the nitrogen dynamics of the nitrogen crop growth model HERMES. Sampling was repeated at the same grid plots each year after harvest and in early spring. The sampling was preformed in two steps. The first sampling design was a grid sampling (grid size: 34 to 96 m) up to 9 dm depth. The second design was has been a nested sampling (grid size: 5 to 6 m) up to 30 dm depth. The nested sampling was preformed once in 1999 with the first sampling and again with the last sampling campaign in 2002. All five fields were divided in a site specific and an uniform fertilization part.

The following results were found:

1. The spatial variability of soil parameters and nutrients were characterized using geostatistical methods. The soil parameters clay, sand, organic matter, mineral nitrogen and water capacity showed different spatial variability's at the investigation sites using semi-variogram analysis. Some locations showed preferred spatial variogram functions. Several soil landscapes differed not only in territorial parts; additional they differed in the same soil landscape (e.g. "Jungmoränegebiete" glacial moraines like Kassow and Thumby).
2. The segmentation of the fields in areas of the same soil type main groups limited the spatial variability from soil moisture to special areas on the field. In contrast the limitation of the spatial variability by soil could not be observed using subdivisions. The same is valid for the grain yield (except for locations with a yearly water balance less than 200 mm). It could be shown that the content of soil mineral nitrogen and the grain yield will be influenced stronger by the environment (such as heavy rain) and management as through the soil type. Dynamic soil parameters as soil moisture and mineral nitrogen showed seasonal spatial variability. Besides that, the soil mineral nitrogen showed a decrease of the spatial variability with the depth at all investigation sites. A reason for this spatial variability is the heterogenous spatial distributions on the fields. The different reduction processes in the soil (e.g. mineralisation) introduces large spatial variability in the top soil from 0 - 3 dm depth. In deeper soil layers is the soil nitrogen content more influenced through shifting and diffusion processes. The results from the nested sampling on the field *Autobahn* showed for the water content, that 50 % of the variability of the subpart Sand existed already in a distance up to 5 m. The soil nitrogen content showed in the nested sampling (grid size 5 m) a higher variability as in the subpart Sand.
3. Direct correlations between the electrical conductivity (EC) and the clay content were not found at all fields. In conditions with a large range of clay content as observed at the field site *Autobahn* a high correlation between the clay content from the sample grid plots and the EC-content was found. In this case co-kriging can help to improve the spatial estimation for clay content. On the fields *Feldscheide-links* and *111-3* EC did not prove to be feasible for clay content estimation. The reason is the small variability from EC-data and clay. Based on the investigations at the field site *Kamp-Ost*, the EC-

measurements should be performed at the end of the summer. The influence of soil wetness and groundwater to the EC appears to be minimized at this time.

4. Observed spatial patterns obtained from grain yield maps depend strongly on the observed weather conditions and the applied management. Through the evaluation of yield maps from different years the influence by weather conditions and management can be reduced. The segmentation in yield zones gives additional guidance for site specific management (such as fertilization). An exception is the field site *Finkenherd*, where the water shortage in the vegetation period led to a pronounced stability in the observed yield patterns. The available water content in this region is the limiting factor for plant growth. In this case (field site *Finkenherd*) the soil texture mimics - the yield map quiet - sufficiently.
5. The nitrogen crop growth model HERMES was applied to simulate the nitrogen dynamics, the soil moisture and the grain yield. All simulation results were checked against the measured data from the sampling in 1999 to 2002. An optimisation of the field capacity of the visual estimate of soil parameters (bulk density, stone content, effective rooting depth and ground water level) led to better correlation at all locations. The simulated spatial grain yield pattern showed a good correlation to the average grain yield measured with a 10 m radius around the sampling point. Less than 25 % of the simulated points on the sampling plots differed more than one standard deviation from measured grain yield. The simulation of nitrogen content showed correlations values below 0.275. However, under very homogeneous nitrogen distributions, no correlations could be observed between measured and simulated values. Hence, just a comparison of average values appears to be more suitable.
6. Soil information for Germany (in little to middle scale soil maps) is published mostly as German Soil Appraisal or in parts as a Digital Farm Soil Map. Simulations with data sets from the plot sampling (large scale soil map) compared against simulating using German Soil Appraisal or digital farm soil map data showed information losses. The temporal dynamic by soil mineral nitrogen content in the rooting zone and the spatial pattern by the grain yield show a much better agreement with observed values, if large scale data were used for the simulation. The agreement of the spatial yield pattern from measuring and simulation decreased when standard information (such as German Soil Appraisal) was used, while frequently local processes were not considered. One mayor point to highlight is, that different soil information gives different amounts of fertilizer recommendations. This led to differences between N-supply and N-demands by the plants. An exact recording of the spatial variability in the field can help to reduce nitrogen leaching and also minimize the costs for the site-specific fertilization. Simulation scenarios showed, that observed differences between uniform and site specific management are influenced by the local site-specific soil parameters in the different management types.
7. The comparison between uniform and site-specific fertilization type showed on the five fields using the *preagro-N* modul fertilizer recommendation (real management) only a minor to no potential to save nitrogen fertilizer. In two cases (fields *Autobahn* and *Feldscheide-links*) were the nitrogen amounts by the site-specific fertilizer larger than on the uniform part. In the field *Autobahn* an increase in fertilizer (+19 kg N ha<sup>-1</sup>) led to 0.5 t dry matter ha<sup>-1</sup> more yield on the site-specific type. At the other fields no differences were detected between different application types. Differences by the soil mineral nitrogen after harvest are influenced by the different fertilizer amounts of the two fertilizer strategies. Significant differences between uniform and site specific fertilization

were not found by grain yield or soil mineral nitrogen after harvest. Results showed that the amount of recommended fertilizer both from the HERMES-model and the real nitrogen fertilization, are beyond the point, where the yield growing curve decreases. Such behaviour is based on: first a fixed plant protein target of 14 % by the simulation and secondly a secure distance to the critical nitrogen factor, below the plant shows a decrease in plant growth.

8. The nitrate threshold value of  $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$  is reached in all investigated fields under uniform and site specific fertilization. The threshold value of drinking water is an important target from an ecological and economical view. The aim for the site-specific management is to calculate a maximal nitrogen fertilizer amount for different soil areas, which never exceed the nitrate threshold value by using long term weather series. However, such limitations may yield less grain yield for the farmers. The field site *Autobahn* showed average yield depressions from 10 to 15 % for a loamy sand, from 15 to 20 % for a sandy loam and from 20 to 25 % for a clay loam.

Generally, site-specific management is an important step on the way to secure the quality and the protection of agriculture resources. One goal of the EU-law in 2005 will requests open access to informations on the production processes. The site-specific management is an innovative management method.

## 7 Literatur

- AASE, J.K. (1978):** Relationship between leaf area and dry matter in winter wheat, *Agron. J.*, 70, S. 563 - 565.
- ADDISCOTT, T.M. (1983):** Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamsted soils with differing histories, *J. Soil Sci.*, 34, S. 343 - 353.
- ADDISCOTT, T.M.; WAGENET, R.J. (1985):** Concepts of solute leaching in soils: A review of modelling approaches, *J. Soil Sci.*, 36, S. 411 - 424.
- ADDISCOTT, T.M.; BLAND, G.J. (1988):** Nitrate leaching models and soil heterogeneity, In: Jenkinson, D.S. Smith, K.A. [Eds.]: Nitrogen efficiency in agricultural soils, Elsevier Appl. Sci., Barking, S. 394 - 408.
- AG BODEN (1994):** Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 392 S.
- AHRENS, E. (1985):** Verlauf der Stickstoff-Mineralisierung im Boden in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit, *Zbl. Mikrobiologie*, Jena, 140, S. 175 - 181.
- ARNOLD, H. (1959):** Übersichtskarte von Nordrhein-Westfalen, 1: 100.000, C 4310 Münster, Geolog. Landesamt Nordrhein-Westfalen [Hrsg.].
- ALTERMANN, M. (1995):** Überblick über die Böden des mitteldeutschen Raumes, *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 77, S. 27 - 29.
- AMBERGER, A.; HUBER, J.; RANK, M. (1987):** Gülleausbringung: Vorsicht, Ammoniakverluste, *DLG-Mitteilgn.*, 20, S. 1084 - 1086.
- AUERNHAMMER, H.; DEMMEL, M. (1993):** Lokale Ertragsermittlung beim Mähdrusch, *Landtechnik*, 48, S. 315 - 319.
- BACH, M (1987):** Die potentielle Nitrat-Belastung des Sickerwassers durch die Landwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland, *Göttinger Bodenkdl. Ber.*, 93, 186 S.
- BALDWIN, J.P.; NYE, P.H.; TINKER, P.B. (1973):** Uptake of solutes by multiple root systems from soil, 3. A model for calculating the solute uptake by a randomly dispersed root system developing in a finite volume of soil, *Plant and Soil*, 38, S. 621 - 635.
- BARRACLOUGH, D. (1986):** The growth and activity of winter wheat roots in the field: Nutrient inflows of high-yielding crops, *J. agric. Sci. Camb.*, 106, S. 53 - 59.
- BARTELS, U. (1991):** Die enzymatische Bestimmung von Ammonium in Niederschlagswasser, *Chemie in Labor und Biotechnik*, 42, S. 377 - 382.

- BEAR, J. (1969):** Hydrodynamic dispersion, In: Wiest, R.J.W. de [Ed.]: Flow through porous media, Academic Press, New York, London, S. 109 - 199.
- BECK, T. (1979):** Die Nitrifikation von Böden (Sammelreferat), Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 142, S. 344 - 364.
- BECK, T. (1983):** Die N-Mineralisierung im Laborbrutversuch, Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 146, S. 243 - 252.
- BECKER, K.-W.; HÖPER, H.; MEYER, B. (1992):** Kritik der Acetylen-Inhibierungs-Methode in ihrer Anwendbarkeit auf Messungen der Denitrifikation im Felde, Vergleich der  $^{15}\text{N}$ -Bilanz- und der  $^{15}\text{N}$ -Gas-Freisetzungsmethode, Göttinger Bodenkdl. Berichte, 96, S. 107 - 344.
- BEEK, J.; FRISSEL, M.J. (1973):** Simulation of nitrogen behaviour in soils, Pudoc, Centre of agricultural publishing and documentation, Wageningen, 67 S.
- BEESE, F. (1982):** Gesetzmäßigkeiten bei Transport gelöster Stoffe, Beiträge zur Hydrologie, Sonderheft, 4, S. 268 - 300.
- BENCKISER, G; SYRING, K.M. (1985):** Erfassung und Modellierung gasförmiger Stickstoffverluste einer Parabraunerde, Z. Dtsch. Geolog. Ges., 136, S. 441 - 450.
- BENCKISER, G; GAUS, G.; SYRING, K.M.; HAIDER, K.; SAUERBECK, D. (1987):** Denitrifikation losses from an Inceptisol field reated with mineral fertilizer or sewage sludge, Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 150, S. 241 - 248.
- BERGER, G. (1992):** Untersuchungen zur Wirkung des Zwischenfruchtanbaus auf die winterliche  $\text{N}_{\text{min}}$ -Dynamik im Boden und die N-Konservierungsleistung unter den spezifischen Bedingungen der sandigen Böden des Norddeutschen Tieflandes, Dissertation, Humboldt Universität zu Berlin, 103 S.
- BIELEK, P. (1997):** Nitrogen transformations to carbon mineralization in soil, In: Ando, T.; Fujita, K.; Mae, T; Matsumoto, H.; Mori, S.; Sekiya, J. [Eds.]: Plant nutrition for sustainable food production and environment, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, S. 763 - 764.
- BLUME, H.-P.; HELSPER, M. (1987):** Kurzmitteilung – Schätzung des Humusgehaltes nach Munsell-Farbhelligkeit, Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 150, S. 354 – 356.
- BÖTTCHER, J. (1983):** Bioelementbilanzen und -transport in Löss- und Sand-Lysimetern bei unterschiedlichen Grundwasserständen, Göttinger Bodenkdl. Berichte, 76, 205 S.
- BOUWER, W.; GÄTH, S.; FRIEDE, H.-G. (1997):** Vergleich dreier Instrumente zur Abschätzung und Kontrolle der nutzungsbedingten Nitratauswaschung auf auswaschungsgefährdeten Standorten, Z. f. Kulturtechnik u. Landesentwicklung, 38, S. 154 – 160.



- BUNDESMINISTER F. JUGEND, FAMILIE UND GESUNDHEIT (1986):** Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe (Trinkwasserverordnung) vom 20.05.1986, Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 22, Bonn, S. 760 - 773.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. (1980):** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, 1. The semivariogram and punctual kriging, *J. Soil Sci.*, 31, S. 315 - 331.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R.; MCBRATNEY, A.B. (1981):** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, 4. Sampling strategy, *J. Soil Sci.*, 32, S. 643 - 659.
- BURROUGH, P.; WEBSTER, R. (1991):** Sampling designs for quantifying map unit compositions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 28, S. 89 - 125.
- CAMERON, D.R.; NYBORG, M.; TOOGOOD, J.A.; LAVERTY, D.H. (1971):** Accuracy of field sampling for soil tests, *Can. J. Soil Sci.*, 51, S. 168 - 175.
- DAGAN, G. (1988):** Time-dependent macrodispersion for solute transport in anisotropic heterogeneous aquifers, *Water Resour. Res.*, 24/9, S. 1491 - 1500.
- DAHIYA, I.S.; KERSEBAUM, K.C.; RICHTER, J. (1984):** Spatial variability of some nutrient constituents of an alfisol from loess, 1. Classical statistical analysis, *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 147, S. 695 - 703.
- DAHMAN-RENS, H. (1995):** Boden und Bodennutzung, In: Geolog. Landesamt Nordrhein-Westfalen [Hrsg.]: *Geologie im Münsterland*, Krefeld, S. 106 - 116.
- DALGAARD, M.; HAVE, H. (2001):** Soil clay mapping by measurements of electromagnetic conductivity, In: Grenier, G.; Blackmore, S. [Eds.]: *Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture*, Montpellier, 1, S. 367 - 372.
- DEMME, M. (2002):** Landtechnische Entwicklungen für Precision Farming, In: Schröder, P.; Huber, B.; Munch, J.C. [Hrsg.]: *Tagungsband des Statusseminars, FAM-Bericht*, 55, S. 57 - 60.
- DESTOUNI, G. (1991):** Applicability of the steady state flow assumption for solute advection in field soils, *Water Resour. Res.*, 27/8, S. 2129 - 2140.
- DIEKKRÜGER, B.; SÖNDGERATH, D.; KERSEBAUM, K.C.; MCVOY, C.W. (1995):** Validity of agroecosystem models, A comparison of results of different models applied to the same data set, *Ecol. Mod.*, 81, S. 3 - 29.
- DIN 19683 (1973):** Physikalische Laboruntersuchungen (Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat), Dtsch. Normenausschuss, Berlin, Köln/Beuth.
- DOBERS, E.S. (2002):** Methoden der Standorterkundung als Grundlage des DGPS-gestützten Ackerbaus – Eine Fallstudie aus dem Lössgebiet des Mittleren Fläming, Dissertation, Universität Göttingen, 237 S.

- DÖHLER, H.; ALDAG, R. (1986):** Mittags gibt es die höchsten Verluste, DLG-Mitteilgn., 6, S. 328 – 331.
- DOMSCH, H.; GIEBEL, A. (2001):** Electrical conductivity of soils typical for the state of Brandenburg in Germany, In: Grenier, G.; Blackmore, S. [Eds.]: Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 1, S. 373 - 378.
- DURLESSER, H. (1999):** Bestimmung der Variation bodenphysikalischer Parameter in Raum und Zeit mit elektromagnetischen Induktionsverfahren, FAM-Bericht, 35, Shaker Verlag, Aachen, 120 S.
- DUYNISVELD, W.H.M.; STREBEL, O. (1986):** Ermittlung der Nitrat-N-Verlagerung aus Ackerböden ins Grundwasser mit Hilfe von Simulationsmodellen, Umweltbundesamt, UBA-Texte 8/86, Forschungsbericht 102 04 329.
- EL-DEMERDASH, M.E. (1981):** Einfluss einiger chemischer-physikalischer Bodeneigenschaften auf die potentielle Denitrifikationskapazität verschiedener Böden in Baden-Württemberg, Universität Hohenheim, 167 S.
- ENGEL, T. (1995):** Expert-N – Ein Baukastensystem für Stickstoffmodelle als Hilfsmittel für Beratung Forschung, Wasserwirtschaft und politische Entscheidungsträger, Abschlussbericht BMBF-Forschungsbericht.
- EVANS, H.J.; BARBER, L. (1977):** Biological nitrogen fixation for food and fiber production, Science, 197, S. 332 - 339.
- FINCK, A. (1997):** Dünger und Düngung – Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen, 2. Aufl., Wiley-Vch, Weinheim, 502 S.
- FOLORUNSO, O.A.; ROLSTON (1984):** Spatial variability of field-measured denitrification gas fluxes, Soil Sci. Soc. Am. J., 48, S. 1214 - 1219.
- FREYTAG, H.E.; LÜTTICH, M. (1988):** Nachweis typischer Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten bei der Mineralisierung der organischen Bodensubstanz (reaktionskinetische Betrachtungsweise), Arch. Acker- u. Pflanzenbau Bodenk., 32, S. 569 - 575.
- FRISSEL, J.; VEEN, J.A. van (1982):** A review of models for investigating the behaviour of nitrogen in soil, Phil. Trans. R. Soc. London, 296, S. 341 - 349.
- FÜRSTENFELD, G.; HETTERICH, T. (1992):** EUF – Bodenuntersuchung und Düngeberatung in einem Mais, 20/4, S. 33 - 34.
- GALLANT, J.C.; WILSON, J.P. (1996):** TAPESG: A terrain analysis program for the environmental sciences, Computers and Geosciences, 22, S. 713 - 722.
- GÄTH, S.; ANTONY, F.; BECKER, K.-W.; GERIES, H.; HÖPER, H.; KERSEBAUM, K.C.; NIEDER, R. (1999):** Bewertung der standörtlichen Denitrifikationsleistung und N-Vorratsänderung von Boden und Bodennutzungssystemen, Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 91/3, S. 1213 - 1216.

- GEBBERS, R. (1997):** Prognose von Bodeneigenschaften in der Jungmoränenlandschaft Mecklenburg-Vorpommerns, Diplomarbeit, Universität Rostock.
- GENUCHTEN, M.T. van; ALVES, W.J. (1982):** Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull., Nr. 1661, Washington, DC.
- GERWITZ, A.; PAGE, E.R. (1974):** An empirical mathematical model to describe plant root systems, J. Appl. Ecol., 11, S. 773 - 781.
- GODWIN, D.C.; JONES, C.A. (1991):** Nitrogen dynamics in soil-plant systems, In: Hanks, J.; Ritchie, J.T. [Eds.]: Modeling plant and soil systems, Am. Soc. of Agron., S. 287 - 321.
- GODWIN, D.C.; SINGH, U. (1998):** Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems, In: Tsuji, G.Y.; Hoogenboom, G.; Thornton, P.K. [Eds.]: Understanding options for agricultural production, Kluwer Academic, Boston, S. 55 - 77.
- GOUDRIAAN, J. (1977):** Crop micrometeorology: A simulation study, Pudoc, Centre for agricultural publishing and documentation, Wageningen, 248 S.
- GOUDRIAAN, J. (1982):** Potential production processes, In: Penning de Vries, F.W.T.; Laar, H.H. van [Eds.]: Simulation of plant growth and crop production, Pudoc, Centre for agricultural publishing and documentation, Wageningen, S. 98 - 113.
- GRANLI, T.; BØCKMAN (1994):** Nitrous oxide from agriculture, Norwegian J. Agr. Sci. Supplement, 12, S. 7 - 128.
- GRENZDÖRFFER, G.J.; GEBBERS, R.I.B. (2001):** Seven years of yield mapping – Analysis and possibilities of multi year mapping data, In: Grenier, G.; Blackmore, S. [Eds.]: Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 1, S. 31 - 36.
- GRIEPENTROCK, H.W. (1998):** Fehlerquellen der Ermittlung beim Mähdrusch, Landtechnik, 53, S. 288 - 289.
- GROOT, J.J.R. (1987):** Simulation of nitrogen balance in a system of winter wheat and soil, Simulation Report CABO-TT, 13, Centre for agrobiological research and Department of Theoretical Production Ecology, Agricultural University Wageningen.
- GROßE, B.; NIKLASCH, E. (1976):** Bodenkarte von Niedersachsen 1: 25.000, Blatt Groß Twülpstedt, In: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung [Hrsg.], Hannover.
- GRÜNHAGE, L.; HERTSTEIN, U.; DÄMMGEN, U.; FLECKENSTEIN, J.; JÄGER, H.-J. (1987):** Auswirkungen von Depositionen saurer Luftverunreinigungen auf Grünlandökosysteme, Forschungsbericht des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Forschungsprojekt 03-7320-4.

- GUTSER, R.; TEICHER, K. (1980):** Bedeutung verschiedener standörtlicher und pflanzenbaulicher Faktoren für die Düngungsempfehlung zu Winterweizen auf Basis von  $N_{\min}$ -Untersuchungen, Landwirtsch. Forschung, 33, S. 95 - 107.
- GUTSER, R.; VILSMEIER, K. (1985):** N-Umsatz von verschiedenem Pflanzenmaterial im Boden in Gefäß- und Feldversuchen, Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 148, S. 95 - 114.
- HACK, J. (1999):**  $N_2O$ -Emissionen und denitrifikationsbedingte Stickstoffverluste landwirtschaftlich genutzter Böden im Elsass unter Berücksichtigung von Boden- und Witterungsfaktoren sowie der nitratreduzierenden und nitrifizierenden Mikroflora, Hohenheimer Bodenkdl. Hefte, 50, 271 S.
- HAGIN, J.; WELTE, M.; DIANATI, M.; KRUH, G.; KENIG, A. (1984):** Nitrogen dynamics model, Verification and practical application, Verlag E. Goltze, Göttingen, 91 S.
- HANSEN, S.; SHAFFER, J.M.; JENSEN, H.E. (1995):** Developments in modelling nitrogen transformations in soil, In: Bacon, P.E. [Ed.]: Nitrogen fertilization and the environment, Marcel Dekker, New York, S. 83 - 107.
- HARGROVE, W.L.; KISSEL, D.E.; FENN, L.B. (1977):** Field measurements of ammonia volatilization from surface applications of ammonium salts to a calcareous soil, Agron. J., 69, S. 473 - 476.
- HAUDE, W. (1955):** Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise, Mitteilgn. Dtsch. Wetterdienst, 11.
- HECK, H.-L. (1960):** Geologische Karte der DDR, Rostock-Wismar-Güstrow, 1: 100.000, Zentraler Geolog. Dienst d. Staatl. Geolog. Kommission der DDR [Hrsg.], Berlin.
- HEERMANN, D.F.; DIKER, K.; BUCHLEITER, G.W.; BODAHN, M.K. (2003):** The value of additional data to locate potential management zones in commercial fields, In: Stafford, J.; Werner, A. [Eds.]: Precision Agriculture, Wageningen Academic Publishers, Berlin, S. 279 - 284.
- HEGER, K. (1978):** Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration über unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen, Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 26, S. 21 - 40.
- HERBST, R. (2002):** Bodenschätzung, geoelektrische Sondierung und pedostatistische Modellierung als Basis von digitalen Hof-Bodenkarten im präzisen Landbau, Dissertation, Universität Kiel, 145 S.
- HERBST, R.; LAMP, J. (2002):** Deutschlandweite Untersuchungen zur räumlichen und attributiven Auswertung der Bodenschätzung für großmaßstäbige Bodenfunktionskarten, Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 99, S. 95 - 96.
- HOMM, A. (1994):** Zur Variabilität der Nitratmengen unter Weidenarben, Wissenschaftl. Fachverlag, Gießen, 129 S.

- HUTSON, J.L. (2000):** LEACHM: Model description and user's guide, School of Chemistry, Physics and Earth Sciences, Flinders University of South Australia, Adelaide, SA, 148 S.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. (1991):** An introduction to applied Geostatistics, Oxford University Press, New York, 561 S.
- ISENSE, E.; ENGELN, P.; GRIEPENTROG, H.W. (1999):** Technik und Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Düngung und Ertragsmessung, Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät, Vorträge zur Hochschultagung, Kiel.
- ISO 10694 (1995):** Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).
- ISO 11461 (1992):** Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens, berechnet auf Grundlage des Volumens.
- ISO 13878 (1995):** Bestimmung von Gesamt-Stickstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).
- ISO 14256 (1995):** Bestimmung von Nitrat, Nitrit und Ammonium in feldfrischen Böden unter Verwendung von Kaliumchlorid als Extraktionsmittel.
- JOERNSGAARD, B.; HALMOE, S. (2003):** Intra-field yield variation over crops and years, Europ. J. Agron., 19, S. 23 - 33.
- JURY, W.A.; SPOSITO, G. (1985):** Field calibration and validation of solute transport models for the unsaturated zone, Soil Sci. Soc. Am. J., 49, S. 1331 - 1341.
- JÜRSCHIK, P.; SCHMERLER, J. (1995):** Teilflächenspezifische Düngung – Erste Bilanz nach der Ernte, Neue Landwirtschaft, 11, S. 72 - 74.
- JÜRSCHIK, P.; GIEBEL, A.; WENDROTH, O. (1999):** Processing of point data from combine harvesters for precision farming, In: Stafford, J. V. [Ed.]: Precision Agriculture '99, Proc. of 2<sup>nd</sup> European Conference on Precision Agriculture, Odense, 1, S. 297 - 307.
- KAHLE, M.; KLEBER, M.; JAHN, R. (2002):** Carbon storage in loess derived surface soils from Central Germany: Influence of mineral phase variables, J. Plant Nutr. Soil Sci., 165, S. 141 - 149.
- KERSEBAUM, K.C. (1989):** Die Simulation der Stickstoff-Dynamik von Ackerböden, Dissertation, Universität Hannover, 141 S.
- KERSEBAUM, K.C. (1993):** Die Stickstoffaufnahme durch Pflanzen im Nmodell HERMES, Agrarinformatik, 24, S. 151 - 159.
- KERSEBAUM, K.C. (1995):** Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics, Ecol. Mod., 81, S. 145 - 156.

- KERSEBAUM, K.C. (1996):** Modellierung der N-Dynamik zur Stickstoffdüngungsoptimierung auf heterogenen Standorten – Voraussetzungen für den operationellen Einsatz in der Praxis, *Landbauforschung Völkenrode*, 3/1996, S. 134 - 140.
- KERSEBAUM, K.C. (1997):** GIS-gestützte Modellierung der N-Dynamik bei unterschiedlicher Bodendatenaggregation für die Agrarlandschaft Chorin, *Arch. f. Nat.-Lands.*, 36, S. 165 - 178.
- KERSEBAUM, K.C. (1998):** Modellgestützte Wirkungsanalyse zur Erhöhung der N-Effizienz und Minderung ökologisch unerwünschter N-Verluste durch die ortsspezifische Anwendung verschiedener Düngerberatungssysteme, In: Werner, A.; Jarfe, A.: *Verbundprojekt Managementsystem ortsspezifischer Pflanzenbau (Projektantrag)*.
- KERSEBAUM, K.C.; BEBLIK, A.J. (2001):** Performance of a nitrogen dynamics model applied to evaluate agricultural management practices, In: Shaffer, M.J.; Ma, L.; Hansen, S. [Eds.]: *Modelling carbon and nitrogen dynamics for soil management*, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, S. 549 - 569.
- KERSEBAUM, K.C.; LORENZ, K. (2002a):** Lokaler N-Austrag, In: *Precision Agriculture – Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis*, KTBL-Sonderveröffentlichung, 38, S. 369 - 383.
- KERSEBAUM, K.C.; LORENZ, K. (2002b):** Einfluss unterschiedlicher Bodeninformationen auf die Ergebnisse von Ertragssimulationen und modellbasierter Düngedarfbsberechnung, In: Wild, K.; Müller, R.A.E.; Birkner U. [Hrsg.]: *Referate der 23. GIL-Jahrestagung in Dresden 2002*, *Berichte der GIL*, 15, S. 226 - 229.
- KERSEBAUM, K.C.; LORENZ, K. (2003):** Lokaler N-Austrag, In: *Precision Agriculture*, Endbericht (unveröffentlicht).
- KERSEBAUM, K.C.; MCVOY, C.W.; FILIUS, A. STRECK, T. (1993):** Stoffdynamik stillgelegter landwirtschaftlicher Flächen – Risikoabschätzung im Vergleich zur intensiven Nutzung aus der Sicht des Bodenschutzes, *Forschungsbericht 107 02 004/03*, Texte Umweltbundesamt, Berlin, 99 S.
- KERSEBAUM, K.C.; LORENZ, K.; WENDROTH, O.; REUTER, H.I.; SCHWARZ, J.; JÜRSCHIK, P. (2001):** Effects of site specific nitrogen fertilization on nitrogen leaching – Comparison of different strategies in arable fields based on observations and simulations, In: Grenier, G.; Blackmore, S. [Eds.]: *Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture*, Montpellier, 2, S. 683 - 688.
- KERSEBAUM, K.C.; LORENZ, K.; REUTER, H.I.; WENDROTH, O. (2002):** Modeling crop growth and nitrogen dynamics for advisory purposes regarding spatial variability. In: Ajuha, L.; Ma, L.; Howell, T. [Eds.]: *Agricultural system models in field research and technology transfer*, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, S. 229 - 251.

- KERSEBAUM, K.C.; GIEBEL, A.; LORENZ, K.; REUTER, H.I.; SCHWARZ, J.; WENDROTH, O. (2003):** Site specific nitrogen fertilization recommendations based on simulation, In: Stafford, J.; Werner, A. [Eds.]: Precision Agriculture, Wageningen Academic Publishers, Berlin, S. 228.
- KEULEN, H. van (1975):** Simulation of water use and herbage growth in arid regions, Pudoc, Centre for agricultural publishing and documentation, Wageningen, 176 S.
- KEULEN, H. van; PENNING DE VRIES, F.W.T; DREES, E.M. (1982):** A summary model for crop growth, In: Penning de Vries, F.W.T.; Laar, H.H. van [Eds.]: Simulation of plant growth and crop production, Pudoc, Centre for agricultural publishing and documentation, Wageningen, S. 87 - 97.
- KIESEL, J. (2002):** Digital aufbereitete Bodenübersichtskarte Deutschlands, 1: 1 Millionen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.], Berlin.
- KNISEL, W.G. (1993):** GLEAMS, Groundwater loading effects of agricultural management systems, Version 2.10, UGA-CPES-BAED, publ. No. 5, 273 S.
- KOHL, R.; HARRACH, T. (1991):** Zeitliche und räumliche Variabilität der Nitratkonzentration in der Bodenlösung in einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch, Z. f. Kulturentwicklung, 32, S. 80 - 87.
- KÖRSCHENS, M.; WEIGEL, A.; SCHULZ, E. (1998):** Turnover of soil organic matter (SOM) and long-term balances – tools for evaluating sustainable productivity of soils, J. Plant Nutr. Soil Sci., 161, S. 409 - 424.
- KURZER, H.J. (1999):** Nitratgehalte im Boden (Dauertestflächen) als Kriterium für die Erfolgskontrolle umweltentlastender Maßnahmen nach dem Förderprogramm “Umweltgerechte Landwirtschaft“ (UL) in Sachsen, Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 91, S. 67 - 70.
- LAMP, J.; CAPELLE, A.; EHLERT, D.; JÜRSCHIK, P.; KLÖPFER, F.; NORDMEYER, H.; SCHRÖDER, D.; WERNER, A. (1998):** Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, In: KTBL [Hrsg.], Darmstadt, 264, S. 7 - 32.
- LEIDIG, E. (1997):** Quantifizierung und modellhafte Beschreibung der Stickstoffverluste durch Denitrifikation im Bearbeitungshorizont landwirtschaftlich genutzter Flächen, Karlsruher Berichte zur Ingenieurbiologie, 35, Aachen, 110 S.
- LEITHOLD, P. (2000):** Der Hydro-N-Sensor bestimmt den Stickstoffbedarf von Getreide, Neue Landwirtschaft, 1, S. 56 - 57.
- LINSTROW, O. von; WIEGERS, F. (1913):** Geologische Karte von Preußen und benachbarter Bundesstaaten, Blatt Cöthen (1:25.000), Königlich Preußische Geologische Landesanstalt [Hrsg.].
- LOZÀN, J.L.; KAUSCH, H. (1998):** Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 2. Aufl., Parey Buchverlag, Berlin, 287 S.

- LÜCK, E. (2002):** Leitfähigkeit zeigt Bodenunterschiede, Ackerbau mit GPS, Bauernzeitung, 43/ 47 Woche, S. 21 - 22.
- LÜCK, E.; EISENREICH, M. (2001):** Electrical conductivity mapping for precision farming, In: Grenier, G.; Blackmore, S. [Eds.]: Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 1, S. 425 - 429.
- LÜCK, E.; EISENREICH, M.; DOMSCH, H. (2002):** Innovative Kartiermethoden für die teilflächenspezifische Landwirtschaft, In: Blumenstein, O.; Schachtzabel, H. [Hrsg.]: Stoffdynamik in Geosystemen, 7, Selbstverlag, Potsdam, 155 S.
- LÜTTICH, M. (1987):** Quantifizierung der Mineralisierung der organischen Bodensubstanz durch Einbeziehung unterschiedlich schnell abbauender Fraktionen, Arch. Acker- u. Pflanzenbau Bodenk., 26, S. 523 - 532.
- MA, L.; SHAFFER, J.M.; AHUJA, L. (2001):** Application of RZWQM for nitrogen management, In: Shaffer, J.M.; Liwang, M.; Hansen, S. (2001): Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, S. 265 - 301.
- MCBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R.; BURGESS, T.M. (1981):** The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables, I. Theorie and method, Computers and Geosciences, 7, S. 331 - 334.
- MEHRAN, M.; TANJI, K.K. (1974):** Computer modeling of nitrogen transformations in soils, J. Environ. Qual., 3, S. 391 - 395.
- MENGEL, K. (1991):** Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze, 7. Aufl., Fischer Verlag, Jena, 466 S.
- MERTENS, H. (1976):** Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1: 50.000, Blatt Beckum, Geolog. Landesamt Nordrhein-Westfalen [Hrsg.], Krefeld.
- MERRIAM, J.; MCDOWELL, W.H.; CURRIE, W.S. (1996):** A high temperature catalytic oxidation technique for determining total dissolved nitrogen, Soil Sci. Soc. Am. J., 60, S. 1050 - 1055.
- MESTWERDT, A. (1914):** Erläuterungen zur geologischen Karte, Blatt Groß Twülpstedt (1: 25.000), Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung [Hrsg.], Hannover.
- METTE, R. (1994):** Ertragsstruktur und Mineralstoffaufnahme von Mais und Hafer im Einflussbereich von Wallhecken, Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart, 126 S.
- MIRSCHER, W.; SCHULTZ, A.; POMMERENING, J. (1993):** Modellierung des Wachstums und der Ertragsbildung in komplexen Agroökosystemmodellen, dargestellt am Beispiel Winterweizen und Winterroggen, In: Reiner, L.; Geidel, H.; Mangstl, A. [Hrsg.]: Expert-N und Wachstumsmodelle – Referate des Anwenderseminars im März 1993 in Weihenstephan; Agrarinformatik, 24, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, S. 183 - 203.



- MÖLLER, D. (1995):** ECOSIM – Ein dynamisches Systemsimulationsmodell für Betriebe des ökologischen Landbaus, Gießener Schriften zur Agrar- und Ernährungswirtschaft, Heft 23, DLG-Verlag, Frankfurt/M., 183 S.
- MOLINA, J.A.E.; CLAPP, C.E.; LARSON, W.E. (1980):** Potentially mineralizable nitrogen in soil – The simple exponential model and carbon transformations in soil: Description, calibration and behavior, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, S. 442 - 443.
- MOLINA, J.A.E; SMITH, P.(1998):** Modeling carbon and nitrogen processes in soils, Adv. Agron., 62, S. 253 - 298.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G.; KREIS, A.; DITTMANN, E. (1997):** Klimaatlas der Bundesrepublik Deutschland, Teil 1, Dtsch. Wetterdienst [Hrsg.], Offenbach/M.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G.; KREIS, A.; DITTMANN, E. (2001):** Klimaatlas der Bundesrepublik Deutschland, Teil 2, Dtsch. Wetterdienst [Hrsg.], Offenbach/M.
- MUHR, T.; NOACK, P.O. (2002):** Aufbereitung von Ertragsdaten, In: KTBL [Hrsg.]: Precision Agriculture, preagro Zwischenbericht, Darmstadt, 38, S. 169 - 178.
- MUTERT, E. (1978):** Untersuchungen zur regionalen Gruppierung von Böden – durchgeführt an einer Kleinlandschaft im Schleswig-Holsteinischen Jungmoränengebiet, Dissertation, Universität Kiel, 224 S.
- MYERS, R.J.K.; CAMPBELL, C.A.; WEIER, K.L. (1982):** Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils, Can. J. Soil Sci., 62, S. 111 - 124.
- NIEDER, R.; SCHOLLMAYER, G.; ZAKOSEK, H. (1989):** Die Rolle der Denitrifikation in der landwirtschaftlich genutzten Böden (eine Literaturanalyse); Z. f. Kulturtechnik u. Landentwicklung, 30, S. 345 - 355.
- NIELSEN, D.R.; WENDROTH, O. (2003):** Spatial and temporal statistics – Sampling field soils and their vegetation, Catena Verlag, Reiskirchen, 398 S.
- NOACK, P.O.; MUHR, T.; DEMMEL, M. (2001):** Long term studies on determination and elimination of errors occurring during the process of georeferenced yield data collection on combine harvesters, In: Grenier, G.; Blackmore, S. [Eds.]: Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 2, S. 833 - 837.
- NORDMEYER, H. (1985):** Die Stickstoffmineralisation von Zuckerrübenblatt im Boden, Dissertation, Universität Hannover, 177 S.
- NORDMEYER, H.; RICHTER, J. (1985):** Incubation experiments on nitrogen mineralisation in loess and sandy soils, Plant and Soil, 83, S. 433 - 445.
- NUSKE, A. (1983):** Ein Modell für die Stickstoff-Dynamik von Acker-Lößböden im Winterhalbjahr – Messungen und Simulationen, Dissertation, Universität Hannover, 164 S.

- O'LEARY, G.J.; CONNORT, D.J.; WHITE, D.H. (1985):** A simulation model of the development, growth and yield of the wheat crop, *Agricultural Systems*, 17, S. 1 - 17.
- OTTE, F. (1988):** Über die quantitative Erfassung der Bodenvariabilität und Gütemaße für großmaßstäbige Karten, Dissertation, Universität Kiel, 133 S.
- PARKIN, T.B. (1987):** Soil microsites as a source of denitrification variability, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, S. 1194 - 1199.
- PARKIN, T.B.; ROBINSON, J.A. (1989):** Stochastic models of soil denitrification, *Appl. Environ. Microbiol.*, 55/1, S. 72 - 77.
- PENNING DE VRIES, F.W.T.; JANSEN, D.M.; BERGE, H.F.M. ten; BAKEMA, A. (1989):** Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops, *Simulation Monographs*, 29, Pudoc, Centre for agricultural publishing and documentation, Wageningen, 271 S.
- PENNOCK, D.J.; ANDERSON, D.W (1992):** Landscale effects of cultivation on soil quality and crop yields in the black soil zone, In: *Proc. of soils and crops (Workshop 1992)*, Saskatoon.
- PHILIP, G.M.; WATSON, D.F. (1986):** A method for assessing local variation among, scattered measurements, *Math. Geologie*, 18, S. 759 - 764.
- PIEFKE, F. (1991):** Simulation mit dem Personalcomputer, Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 410 S.
- PLOEG, R.R. van der; MACHULLA, G.; RINGE, H. (1995):** Ein Mischzellenmodell zur Abschätzung der Nitratauswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Böden im Winterhalbjahr, *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 158, S. 365 - 373.
- PORTER, J.R.; JAMIESON, P.D.; WILSON, D.R. (1993):** Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for nonlimiting conditions of crop growth, *Field Crops Research*, 33, S. 131 - 157.
- REICHE, E. (1998):** Bodenschätzung-Standard-Auswertung Schleswig-Holstein (BOSSA\_SH) – Eine Methode zur computergestützten Übersetzung, Parametrisierung und planungsbezogenen Bodenbewertung, *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 87, S. 39 - 42.
- REIF, A.; KNOP, C.; ZAHNER, K.; SCHULZE, E.D. (1984):** Die Beziehung von Hecken und Ackerrainen zu ihrem Umland, In: Schulze, E.D.; Reif, A.; Küppers, M. [Hrsg.]: *Die pflanzenökologische Bedeutung und Bewertung von Hecken*, Akademie f. Naturschutz u. Landschaftspflege, Beiheft 3, Teil 1, Laufen/Sal, S. 125 - 137.
- REIMER, G. (2003):** Spektrale Naherkundung und Ertragskartierung als Basis von digitalen Hof-Bodenkarten im Präzisen Landbau, Dissertation, Universität Kiel, 136 S.
- REIMER, G.; LAMP, J. (2002):** GIS-gestützte Vergleiche von Bodenschätzungs- und Ertragskarten, *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 99, S. 99 - 100.

- RENGER, M.; STREBEL, O. (1980):** Beregnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit vom Boden, Wasser u. Boden, 12, S. 572 - 575.
- REUTER, H.I.; KERSEBAUM, K.C.; SCHWARZ, J.; WENDROTH, O. (2001):** Einstrahlungsmodellierung – Ein Ansatz zum Verständnis der Ertragsvariabilität innerhalb von Praxisflächen, *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 96/1, S. 109 - 110.
- RICHTER, J. (1986):** Der Boden als Reaktor – Modelle für Prozesse im Boden, Enke Verlag, Stuttgart, 39 S.
- RICHTER, J.; NUSKE, A.; HABENICHT, W.; BAUER, J. (1982):** Optimized N-mineralization parameters of loess soils from incubation experiments, *Plant and Soil*, 68, S. 379 - 388.
- RICHTER, J., NORDMEYER, H.; KERSEBAUM, K.C. (1985):** Simulation of the nitrogen regime in loess soils in winter: Comparison between field measurements and simulations In: Neeteson, J.J.; Dilz, K. [Eds.]: *Assessment of nitrogen fertilizer requirement*, Inst. Soil Fert., Haren, S. 139 - 158.
- RITCHIE, J.T. (1985):** A user-orientated model of the soil water balance in wheat, In: Day, W.; Atkin, R.K. [Eds.]: *Wheat growth and modelling*, Plenum press, New York, S. 293 - 305.
- RITCHIE, J.T.; GODWIN, D.C.; OTTER-NACKE, S. (1988):** CERES-Wheat, Michigan State University, 193 S.
- ROTHKEGEL, W. (1952):** Landwirtschaftliche Schätzlehre, 2. Aufl., Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 191 S.
- ROLSTON, D.E. (1990):** Modeling of denitrification: Approaches, successes and problems, *International Workshop on Denitrification in Soil, Rhizosphere and Aquifer (1989)*, Gießen, *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 60, S. 397 - 402.
- RUHR-STICKSTOFF [Hrsg.] (1993):** Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 12. Aufl., Landwirtschaftsverlag, Münster, 618 S.
- SALOW, C. (1996):** Ammoniakemissionen nach dem Ausbringen von Gülle, *Arch. Acker- u. Pflanzenbau Bodenk.*, 40, S. 57 – 64.
- SAUER, S.; HAUBMANN, W.; HARRACH, T. (2002):** Effektive Durchwurzelungstiefe, Sickerwasserbildung und Nitratverlagerung in tiefgründigen Lössböden eines Trockengebietes, *Z. Pflanzenernähr. u. Bodenk.*, 165, S. 269 - 273.
- SCHARPF, H.C. (1977):** Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngerbedarf, Dissertation, Universität Hannover, 172 S.
- SCHEIDEGGER, A.E. (1961):** General theory of dispersion in porous media, *J. Geophys. Res.*, 66/10, S. 3273 - 3278.
- SCHERER, H.W. (1987):** Zur Verfügbarkeit von Zwischenschicht-Ammonium der Tonminerale, *Landwirtsch. Forschung*, 40, S. 259 - 274.

- SCHMIDT, F. (1993):** Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen von Modell-Validierungen anhand empirischer Messwerte, In: Reiner, L.; Geidel, H.; Mangstl, A. [Hrsg.]: Agrarinformatik, 24, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, S. 285 - 299.
- SCHMIDT, F. (2001):** Erfassung, Interpolation und Auswertung von digitalen Geländemodellen für die Landwirtschaft, Z. f. Vermessungswesen, 3, S. 128 - 134.
- SCHMIDT, R. (1982):** Die Struktur der Bodendecke der Grundmoränengebiete der DDR, Petermanns Geograph. Mitteilgn., 3, S. 153 - 170.
- SCHNEIDER, U. (1991):** Messungen von Denitrifikations- und Nitratauswaschungsverlusten in einem landwirtschaftlich genutzten Wassereinzugsgebiet, Dissertation, Universität Bonn, 86 S.
- SCHULTZ, A. (1997):** Informationsbedarf, Komplexität und Aussagegenauigkeit von landschaftsbezogenen Simulationsmodellen, Arch. f. Nat.-Lands., 36, S. 107 - 124.
- SCHWEDER, P.; KAPE, E.; NEUBAUER, W. (1998):** Düngung 1998 – Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis, Leitfaden zur Umsetzung der Düngerverordnung, Ministerium für Landwirtschaft und Naturschutz, Schwerin.
- SEXSTONE, A.J.; PARKER, T.B.; TIEDJE, J.M. (1985):** Temporal response of soil denitrification rates to rainfall and irrigation, Soil Biol. Biochem., 20, S. 851 - 856.
- SHAFFER, J.M.; HALVORSON, A.D.; PIERCE, F.J. (1991):** Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP): Model description and application, In: Follett, R.F.; Keeney, D.R.; Cruse, R.M. [Eds.]: Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, S. 285 - 322.
- SHAFFER, J.M.; LIWANG, M.; HANSEN, S. (2001):** Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, 561 S.
- SINOWSKI, W. (1995):** Die dreidimensionale Variabilität von Bodeneigenschaften, FAM-Bericht, 7, Shaker Verlag, Aachen, 157 S.
- SKUPIN, K.; STAUDE, H. (1995):** Quartär, In: Geolog. Landesamt Nordrhein-Westfalen [Hrsg.]: Geologie im Münsterland, Krefeld, S. 71 - 95.
- SMITH, K.A. (1980):** A model of the extent of anaerobic zones in aggregated soils and its potential application to estimates of denitrification, J. Soil Sci., 31, S. 263 - 277.
- SMITH, O.L. (1982):** Soil microbiology: A model of decomposition and nutrient cycling, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, 273 S.
- SOMMER, M.; WEHRHAN, M.; ZIRICH, M.; WELLER, U.; ZU CASTELLS, W.; EHRLICH, S. (2001):** Fernerkundung, Reliefanalyse und EM38 – Instrumente zur Analyse und Abbildung mesoskaliger Bodenheterogenität, Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 2, S. 563 - 564.

- SPRINGOB, G.; ANLAUF, R.; KERSEBAUM, K.C.; RICHTER, J. (1985):** Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalten zweier Schläge auf Löss-Parabraunerden, *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 43/2, S. 691 - 696.
- STAFFORD, J.V. (1999):** An investigation into the within-field spatial variability of grain quality, In: Stafford, J. V. [Ed.]: *Precision Agriculture '99, Proc. of 2<sup>nd</sup> European Conference on Precision Agriculture*, Odense, 1, S. 353 - 361.
- STANFORD, G.; SMITH, S.J. (1972):** Nitrogen mineralization potentials of soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, S. 465 - 472.
- STANFORD, G.; DZIENIA, S.; POL, R.A. vander (1975a):** Denitrification rates in relation to total and extractable soil carbon, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 39, S. 284 - 289.
- STANFORD, G.; POL, R.A. vander; DZIENIA, S. (1975b):** Effect of temperature on denitrifikation rate in soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 39, S. 867 - 870.
- STENGER, R.; PRIESACK, E. BEESE, F. (1992):** Räumliche Variabilität von  $N_{min}$ -gehalten in einer Agrarlandschaft des Tertiären Hügellandes – Auswertung mit klassischer Statistik und Geostatistik, *Kongressband; VDLUFA-Schriftenreihe*; 35, S. 729 - 732.
- STEVENSON, F. J. (1982):** Origin and distribution of nitrogen in soil, In: Stevenson, F.J. [Ed.]: *Nitrogen in agricultural soils*, *Agronomy*, 22, S. 1 - 42.
- STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. (1999):** *Cycles of soil*, 2. Aufl., Wiley and Sons, New York; 428 S.
- STOCK, A. (1995):** Untersuchung zur räumlichen Variabilität des Stofftransportes in der wasserungesättigten Bodenzone, *Dissertation*, TU Braunschweig, 170 S.
- STREBEL, O.; DUYNISVELD, W.H.M. (1989):** Nitrogen supply to cereals and sugar beet by mass flow and diffusion on a silty loam soil, *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 152, S. 135 - 141.
- STREIT, U. (1981):** Zur Methodik der Interpolation und Mittelbildung punktbezogener Daten bei räumlichen Informationssystemen, *Klagenfurter Geogr. Schriften*, S. 309 - 333.
- STREMME, H. (1981):** Bodenkarte von Schleswig-Holstein, 1: 500.000, *Geolog. Landesamt [Hrsg.]*, Kiel.
- SUPIT, I.; HOOLIJER, A.A.; DIEPEN, C.A. van (1994):** System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol. 1: Theory and algorithms, *EC Publ. EUR 15956*, Luxemburg, 146 S.
- SYRING, K.M.; BENCKISER, G. (1990):** Modeling denitrification losses from arable land, *International Workshop on Denitrification in Soil, Rhizosphere and Aquifer (1989)*, *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 60, S. 403 - 406.

- TESKE, W.; MATZEL, W.; HEBER, R. (1988):** Beeinflussung des Nitrifikationsverlaufes durch Bodeneigenschaften, Temperatur und Nitrifikationsinhibitoren, Acker- u. Pflanzenbau Bodenk., 32, S. 697 - 703.
- ULRICH, B. (1986):** Raten der Deposition, Akkumulation und des Austrags toxischer Luftverunreinigungen als Maß der Belastung und Belastbarkeit von Waldökosystemen, Bericht Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe B, 2, S. 1 - 210.
- VANDRÈ, R. (1997):** Ammoniakausgasung aus Gülle nach der Ausbringung, Faktoren und Möglichkeiten der Minderung, Bayreuther Bodenkdl. Berichte, 56, 85 S.
- VDLUFA (1997):** Die Untersuchung von Böden, Methodenbuch, 1, 5. Aufl., Berlin.
- VEEN, J.A. van; FRISSEL, M.J. (1981):** Simulation model of the behaviour of N in soil, In: Frissel, M.J.; Veen, J.A. van [Eds.]: Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems, Pudoc, Centre for agricultural publishing and documentation, Wageningen, S. 126 - 144.
- VEEN, J.A. van; LADD, J.N.; FRISSEL, M.J. (1984):** Modelling C and N turnover through the microbial biomass in soil, Plant and Soil, 76, S. 257 - 274.
- VIELEMEYER, H.-P.; NEUBERT, P.; HUNDT, I.; VANSELOW, G.; WEISSERT, P. (1983):** Ein neues Verfahren zur Ableitung von Pflanzenanalyse-Grenzwerten für die Einschätzung des Ernährungszustandes landwirtschaftlicher Kulturpflanzen, Arch. Acker- u. Pflanzenbau Bodenk., 27, S. 445 - 453.
- VILSMAYER, K.; AMBERGER, A. (1981):** Modellversuche zur Mineralisation verschiedenen Pflanzenmaterials in Abhängigkeit von der Temperatur, Landwirtsch. Forschung, 34, S. 234 - 241.
- VINTHER, F.P. (1984):** Total denitrification and the ratio between  $N_2O$  and  $N_2$  during the growth of spring barley, Plant and Soil, 76, S. 227 - 232.
- WEHRMANN, J.; SCHARPF, H.C. (1986):** The  $N_{min}$ -method – an aid to integrating various objectives of nitrogen fertilization, Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 149, S. 428 - 440.
- WEIR, A.H.; BRAGG, P.L.; PORTER, J.R.; RAYNER, J.H. (1984):** A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations, J. agric. Sci. Camb, 102, S. 371 - 382.
- WELTZIEN, C. (2001):** Technikbetreuung und -vergleich, preagro Zwischenbericht, S. 9 - 28.
- WELTZIEN, C.; PERSSON, K. (2001):** Decision strategies for variable rate fertilisation, In: Grenier, G.; Blackmore, S. [Eds.]: Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 2, S. 737 - 742.

- WELTZIEN, C.; CHAPPUIS, A. von; KROMER, K.-H.; PERSSON, K.; RESNIK, B.; SCHMITTMANN, O. (2002):** Technikbetreuung und -vergleich, In: KTBL [Hrsg.]: Precision Agriculture, preagro Zwischenbericht, Darmstadt, 38, S. 153 - 167.
- WENDROTH, O.; REYNOLDS, W.; VIERA, S.; REICHHARDT, R.; WIRTH, S. (1997):** Statistical approaches to the analysis of soil quality data, In: Gregorich, E.G.; Carter, M.R [Eds.]: Soil quality for crop production and ecosystem health, Elsevier-Verlag, Amsterdam, S. 247 - 276.
- WENDROTH, O.; JÜRSCHIK, P.; KERSEBAUM, K.C.; REUTER, H.I.; KESSEL, C. van; NIELSEN, D.R. (2001):** Identifying, understanding and describing spatial processes in agricultural landscapes – four case studies, In: Kessel, C. van; Wendroth, O. [Eds.] Special issue: Landscape Research – Exploring ecosystem processes and their relations at different scales in space and time, Soil Till. Res., 58, S. 113 - 128.
- WENDROTH, O.; REUTER, H.I.; KERSEBAUM, K.C.; JÜRSCHIK, P.; SCHWARZ, J. (2002):** Räumliche Variabilität von Boden- und Pflanzenbestandseigenschaften in landwirtschaftlich genutzten Flächen – Änigma oder Grundlage zur spezifischen Bewirtschaftung?, In: KTBL [Hrsg.]: Precision Agriculture, preagro Zwischenbericht, Darmstadt, 38, S. 21 - 23.
- WENKEL, K.O.; BROZIO, S.; GEBBERS, R.; KERSEBAUM, K.C.; LORENZ, K. (2001):** Development and evaluation of different methods for estimating variable site specific nitrogen fertilization rates of winter wheat, In: Grenier, G.; Blackmore, S. [Eds.]: Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 2, S. 743 - 748.
- WENKEL, K.O.; BROZIO, S.; GEBBERS, R. (2002):** Düngung, In: KTBL [Hrsg.]: Precision Agriculture, preagro Zwischenbericht, Darmstadt, 38, S. 251 - 273.
- WERNER, A.; JARFE, A.; KLÖPFER, F.; KOTTENRODT, D. (2002):** Forschungskonzept und Projektstruktur von preagro, In: KTBL [Hrsg.]: Precision Agriculture, preagro Zwischenbericht, Darmstadt, 38, S. 483 - 500.
- WHITEMORE, A.P.; ADDISCOTT, T.M. (1987):** A function for describing nitrogen uptake, dry matter and rooting by wheat crops, Plant and Soil, 101, S. 51 - 60.
- WILLIAMS, J.R. (1995):** The EPIC model, In: Singh, V.P. [Ed.]: Computer models of watershed hydrology, Water Resour. Publ., Highlands Ranch, CO, S. 909 - 1000.
- WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. (2000):** Terrain analysis – Principles and applications, Wiley and Sons, New York, 512 S.
- WOLLRING, J. (1996):** Der Stickstoffbedarf des Getreides wird fotografisch ermittelt, Ernährungsdienst, 51, 13 S.
- WOLLRING, J.; WEHRMANN, J. (1989):** Der Nitratgehalt in der Halmbasis als Maßstab für den Stickstoffdüngerbedarf bei Wintergetreide, Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 153, S. 47 - 53.

## 8 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsfor-  
schung (ZALF) e.V., im Institut für Landschaftssystemanalyse angefertigt.

Allen Mitarbeitern des Instituts, die mich in den zurückliegenden Jahren meines dortigen  
Aufenthalts fachlich wie moralisch unterstützt haben, möchte ich an dieser Stelle danken.

Ganz besonders bin ich Herrn Dr. K.C. Kersebaum zu Dank verpflichtet, der mich zu dieser  
Arbeit ermuntert hat und mir mit Rat und Geduld zur Seite gestanden hat.

Dr. O. Wendroth und Dr. H.I. Reuter danke ich für die Unterstützung bei der Geostatisti-  
schen Auswertung und die fachliche Kritik.

Frau Prof. J. Zeitz möchte ich für die Übernahme der Betreuung von Seiten der Humboldt  
Universität und für die fachlichen Hinweise zur Arbeit danken.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir durch ihre finanzielle Unterstützung  
den Weg geebnet haben.

Weiterer Dank gilt folgenden Institutionen und Personen:

dem BMBF für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens *preagro*,

allen Kollegen im Projekt *preagro*, mit denen immer ein sehr intensiver fachlicher Aus-  
tausch möglich war,

den Praxisbetrieben im Projekt, die uns immer den Zugang zu den Versuchsflächen ermög-  
licht haben und zudem als wichtige Informationsquelle zur Verfügung standen,

meinen Kollegen Herrn M. Bähr, Dipl. Ing. geoökol. S. Brozio und Dipl. Ing. agrar. R. Geb-  
bers für die Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Probenahme,

dem Zentrallabor für die Vielzahl an durchgeführten Laboranalysen sowie Frau Dr. H. Krau-  
delt von der Universität Potsdam für die unkomplizierte Unterstützung bei der Analyse von  
Texturproben mittels Laserdiffraktometer.



## 9 Anhang

**Tab. 9.1:** Übersicht über Managementmaßnahmen auf Schlag *Feldscheide-links* während des Untersuchungszeitraums von 2000 bis 2002 (ohne Pflanzenschutz)

Datum	Maßnahme (Düngemittel)	Menge/Tiefe
19.08.00	Ernte Winterweizen	4.7 t TM/ha
18.09.00	Grunddüngung: einheitlich (NPK)	18 kg N/ha
18.09.00	Bodenbearbeitung	15 cm
21.09.00	Aussaat Wintergerste <i>Nickel</i>	
04.04.01	1. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	50 - 60 kg N/ha
25.04.01	2. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	70 - 80 kg N/ha
20.05.01	3. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	20 - 30 kg N/ha
21.07.01	Ernte Wintergerste	5.0 t TM/ha
23.07.01	Grunddüngung: einheitlich (NPK)	36 kg N/ha
29.08.01	Bodenbearbeitung	15 cm
30.08.01	Aussaat Winterraps <i>Artus</i>	
23.02.02	1. N-Düngung: einheitlich (Piamon)	41 kg N/ha
14.03.02	2. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	60 - 80 kg N/ha
06.04.02	3. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	60 - 80 kg N/ha
29.07.02	Ernte Winterraps	4.4 t TM/ha
30.07.02	Grunddüngung: einheitlich (NPK)	36 kg N/ha

Bemerkung: NPK – Stickstoff-Phosphor-Kalium

**Tab. 9.2:** Übersicht über Managementmaßnahmen auf Schlag *III-3* während des Untersuchungszeitraums von 1999 bis 2001 (ohne Pflanzenschutz)

Datum	Maßnahme (Düngemittel)	Menge/Tiefe
20.07.99	Ernte Winterraps	2.4 t TM/ha
25.09.99	Bodenbearbeitung	10 cm
26.09.99	Aussaat Winterweizen <i>Toronto</i>	
07.04.00	1. N-Düngung: variabel (KAS)	30 - 50 kg N/ha
03.05.00	2. N-Düngung: variabel (KAS)	65 - 90 kg N/ha
29.05.00	3. N-Düngung: variabel (KAS)	45 - 75 kg N/ha
24.08.00	Ernte Winterweizen mit Stripper	7.3 t TM/ha
29.09.00	Bodenbearbeitung (Schleppen)	
07.10.00	Ausbringung von Klärschlamm	ca. 61 kg N/ha
09.10.00	Bodenbearbeitung	10 cm
12.10.00	Aussaat Winterweizen <i>Maverik</i>	
13.10.00	Aussaat Winterweizen <i>Hybnos</i>	
22.03.01	1. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	60 - 70 kg N/ha
10.04.01	2. N-Düngung: variabel (KAS)	55 - 80 kg N/ha
06.06.01	3. N-Düngung: variabel (KAS)	20 - 45 kg N/ha
30.08.01	Ernte Winterweizen	6.8 t TM/ha
08.10.01	Grunddüngung: einheitlich (NPK)	25 kg N/ha
08.10.01	Bodenbearbeitung	10 cm
08.10.01	Aussaat Wintergerste <i>Alissa</i>	

Bemerkung: KAS – Kalkammonsalpeter, NPK – Stickstoff-Phosphor-Kalium

**Tab. 9.3:** Übersicht über Managementmaßnahmen auf dem Schlag *Kamp-Ost* während des Untersuchungszeitraums von 1999 bis 2002 (ohne Pflanzenschutz)

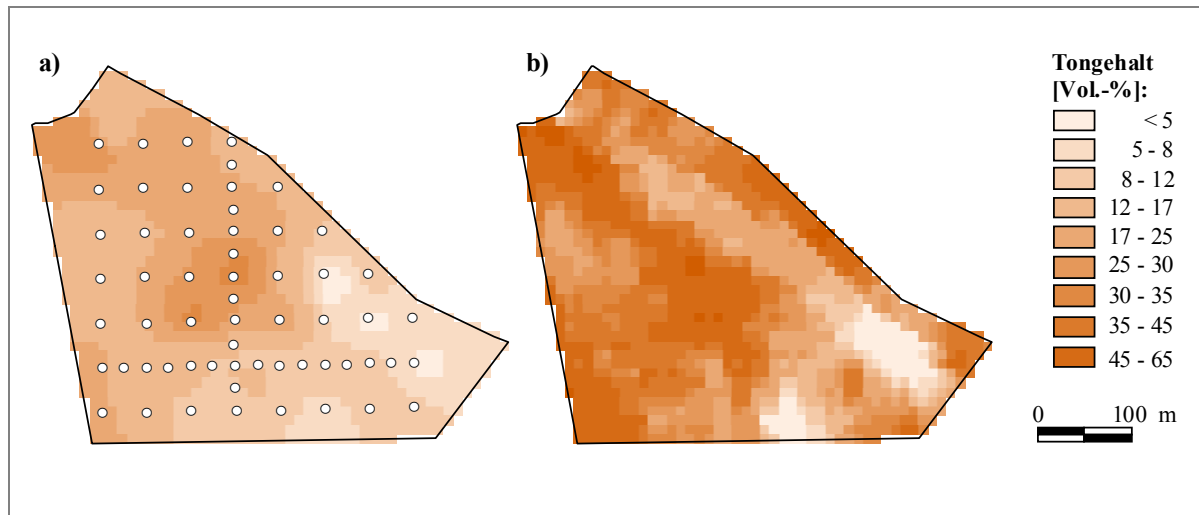
Datum	Maßnahme (Düngemittel)	Menge/Tiefe
03.08.99	Ernte Winterweizen	5.7 t TM/ha
15.08.99	Bodenbearbeitung	25 cm
07.10.99	Aussaat Winterweizen <i>Ludwig</i>	
01.04.00	1. N-Düngung: einheitlich (Harnstoff)	40 kg N/ha
14.04.00	2. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	70 - 85 kg N/ha
14.05.00	3. N-Düngung: variabel (AHL)	40 - 60 kg N/ha
12.08.00	Ernte Winterweizen	5.7 t TM/ha
29.09.00	Bodenbearbeitung	25 cm
30.09.00	Aussaat Wintergerste <i>Carola</i>	
27.11.00	Herbizideinsatz mit N-Ausbringung (AHL)	14 kg N/ha
16.03.01	1. N-Düngung: einheitlich (SSA)	50 kg N/ha
10.04.01	2. N-Düngung: variabel (NIT)	30 - 50 kg N/ha
06.05.01	3. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	40 - 70 kg N/ha
23.07.01	Ernte Wintergerste	4.6 t TM/ha
01.08.01	Bodenbearbeitung/ Stoppelumbruch	30 cm
11.04.02	Bodenbearbeitung	10 cm
15.04.02	Aussaat Zuckerrüben <i>Belinda</i> + PK-Düngung	
24.04.02	1. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	50 - 90 kg N/ha
21.05.02	2. N-Düngung: variabel (Harnstoff)	30 - 60 kg N/ha
21.06.02	3. N-Düngung: einheitlich (Harnstoff)	20 kg N/ha
22.09.02	Ernte Zuckerrüben	ca. 32 t /ha

**Bemerkung:** AHL – Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung, NIT – Nitroposka, SSA – schwefelsaurer Ammoniak, KAS – Kalkammonsalpeter, PK – Phosphor-Kalium-Düngung

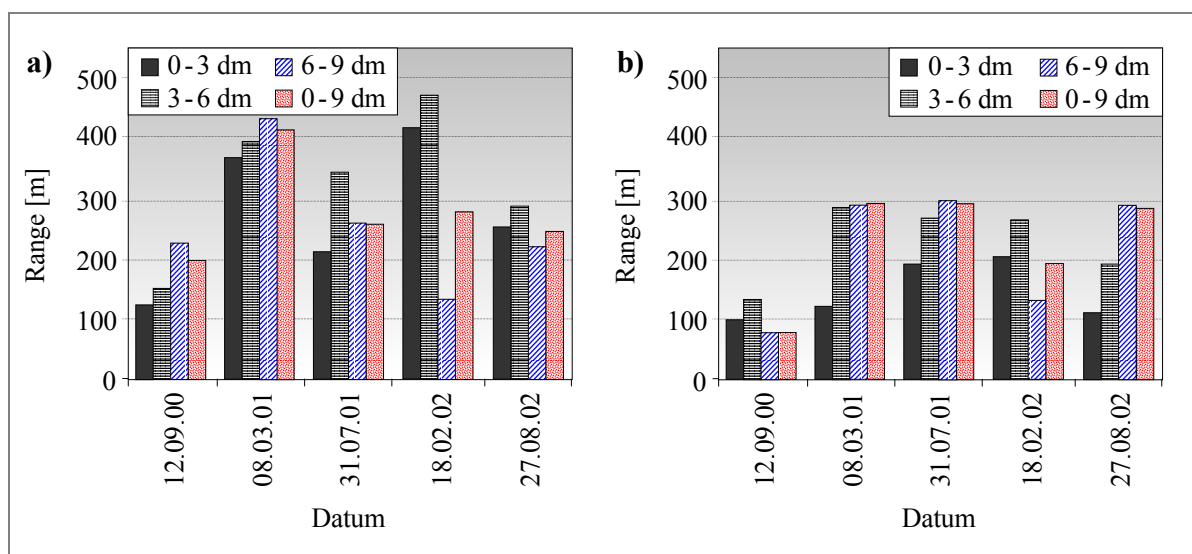
**Tab. 9.4:** Übersicht über Managementmaßnahmen auf Schlag *Finkenherd* während des Untersuchungszeitraums von 2000 bis 2002 (ohne Pflanzenschutz)

Datum	Maßnahme (Düngemittel)	Menge/Tiefe
10.08.00	Ernte Winterweizen	5.2 t TM/ha
27.08.00	Bodenbearbeitung	12 cm
29.08.00	Aussaat Winterraps <i>Artus</i>	
15.02.01	1. N-Düngung: variabel (Piamon)	60 - 101 kg N/ha
12.04.01	2. N-Düngung: einheitlich (Alzon)	99 kg N/ha
25.07.01	Ernte Winterraps	3.4 t TM/ha
17.10.01	Bodenbearbeitung	16 cm
18.10.01	Aussaat Winterweizen <i>Ritmo</i>	
26.03.02	1. N-Düngung: variabel (Piagran)	40 - 70 kg N/ha
23.04.02	2. N-Düngung: variabel (Piagran)	85 - 95 kg N/ha
21.05.02	3. N-Düngung: variabel (KAS)	30 - 50 kg N/ha
25.08.02	Ernte Winterweizen	6.6 t TM/ha

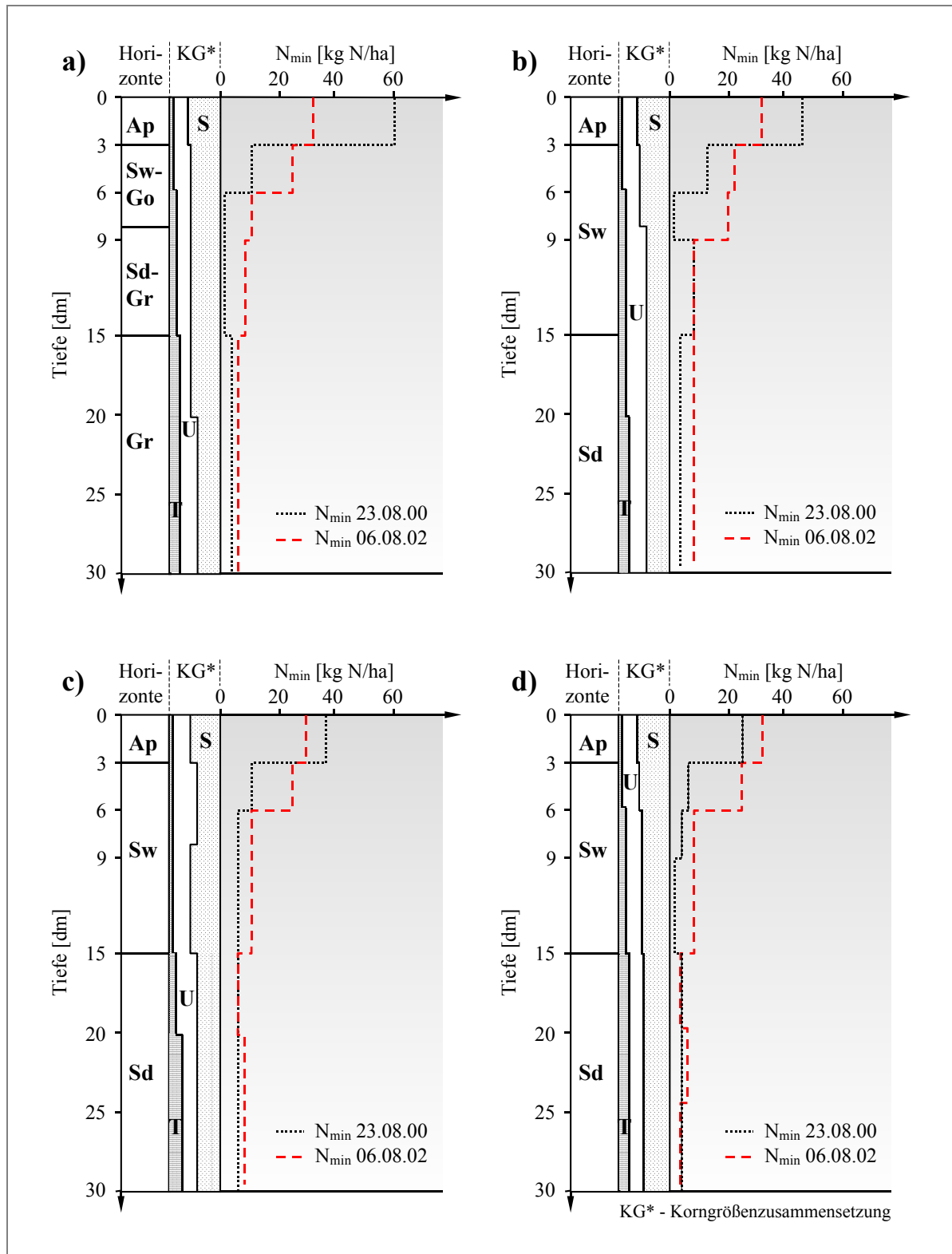
**Bemerkung:** KAS – Kalkammonsalpeter



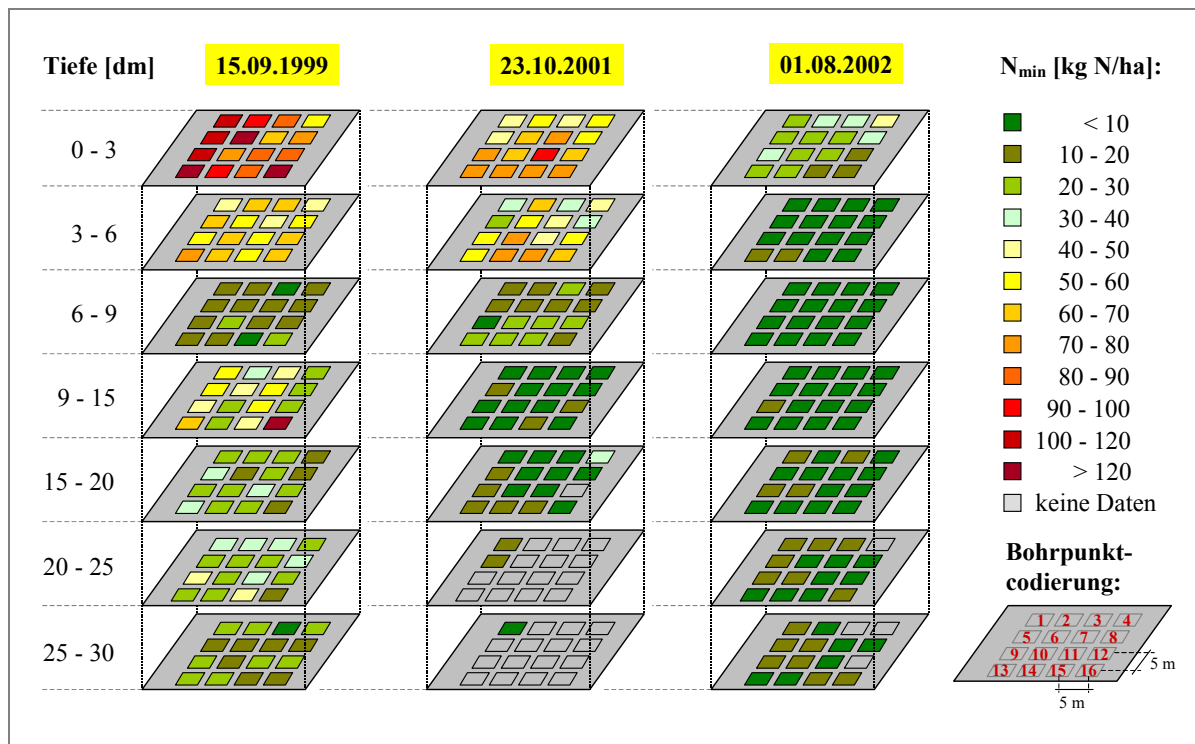
**Abb. 9.1:** Tongehaltskarten vom Schlag *Kamp-Ost*: a) mittlerer Tongehalt in 0 - 9 dm nach Rasterbeprobung, b) Tonverteilung nach EC-Messung



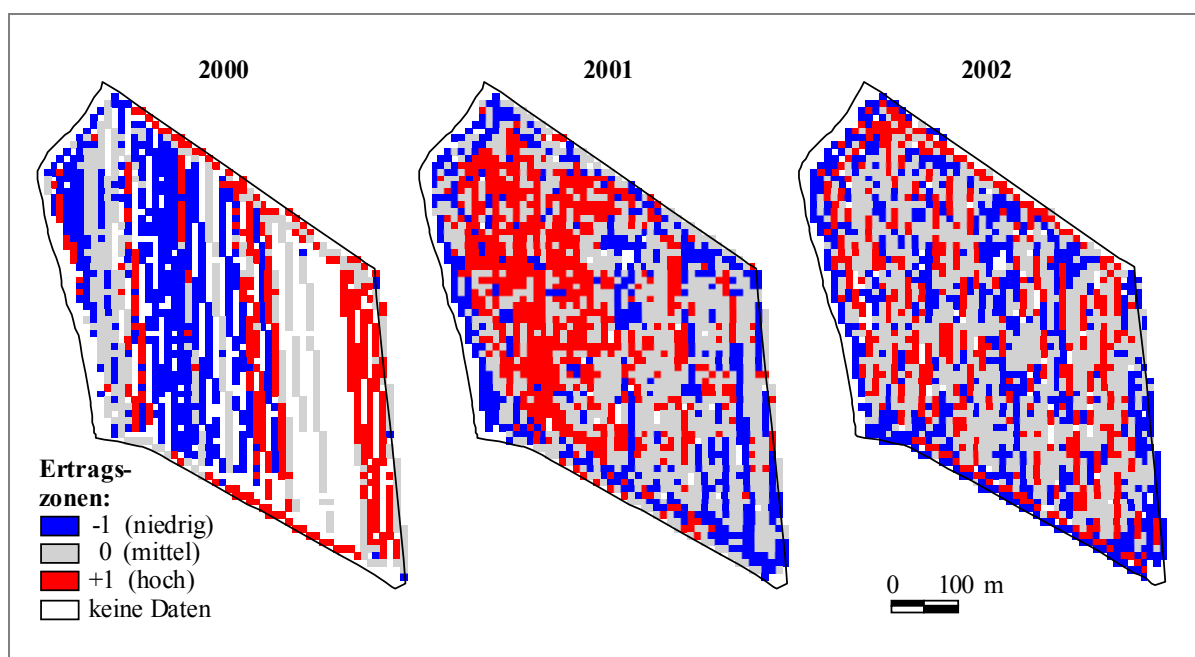
**Abb. 9.2:** Grafische Darstellung des Range für die untersuchten Tiefenzonen zu verschiedenen Messterminen auf Schlag *Finkenherd*: a) volumetrischer Wassergehalt und b)  $N_{\min}$ -Gehalt



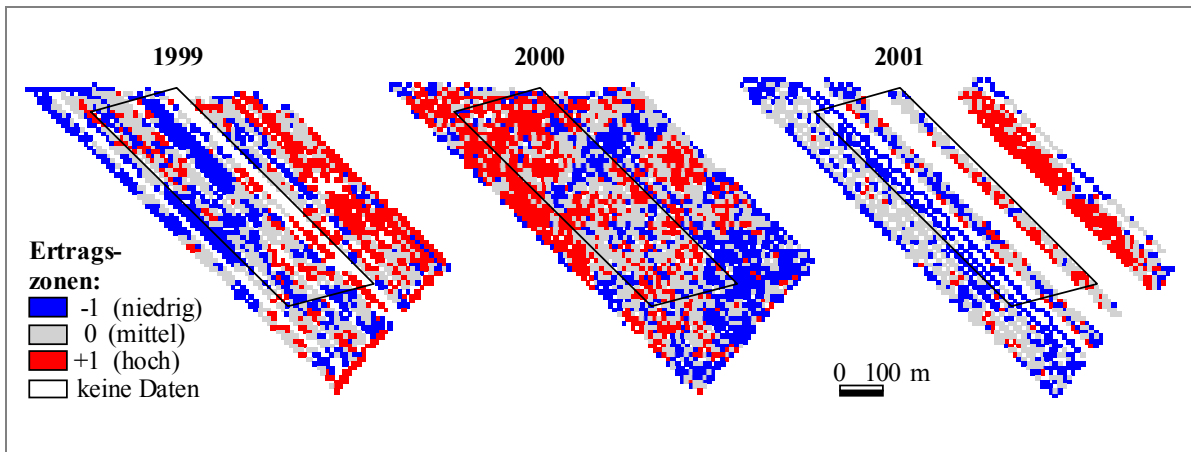
**Abb. 9.3:** Darstellung der  $N_{\min}$ -Kurve über die Tiefe zu verschiedenen Messterminen für Schlag *Feldscheide-links*: a) Nest 1, b) Nest 2, c) Nest 3, d) Nest 4



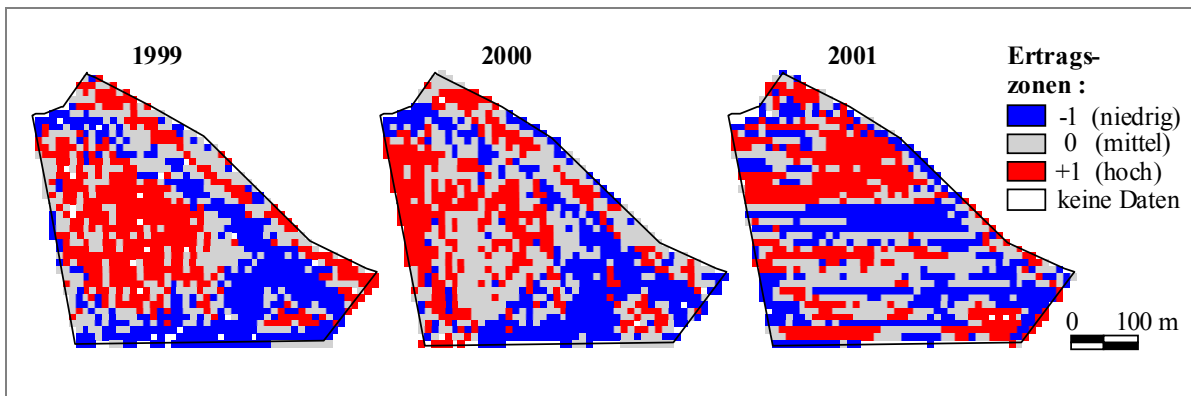
**Abb. 9.4:** Darstellung der  $N_{\min}$ -Tiefenverteilung zu verschiedenen Messterminen im Nest 2 auf Schlag Autobahn



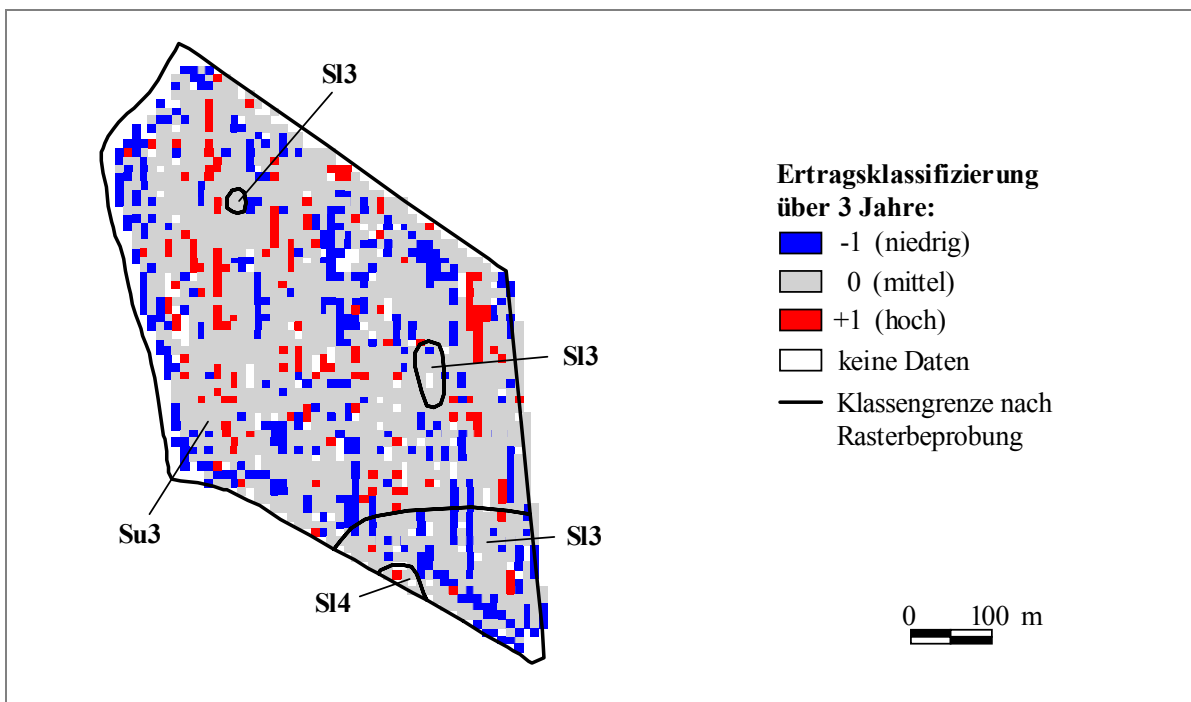
**Abb. 9.5:** Zonierung der Ertragskarten von 2000 bis 2002 für Schlag *Feldscheide-links*



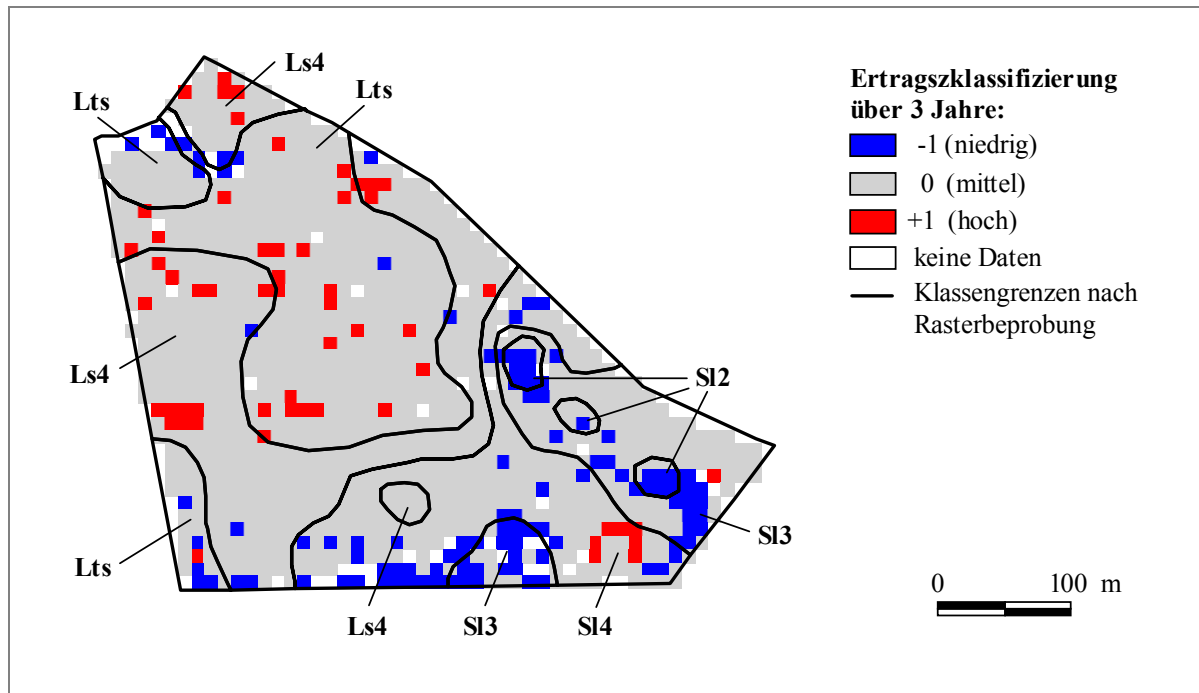
**Abb. 9.6:** Zonierung der Ertragskarten von 1999 bis 2001 für Schlag *III-3*



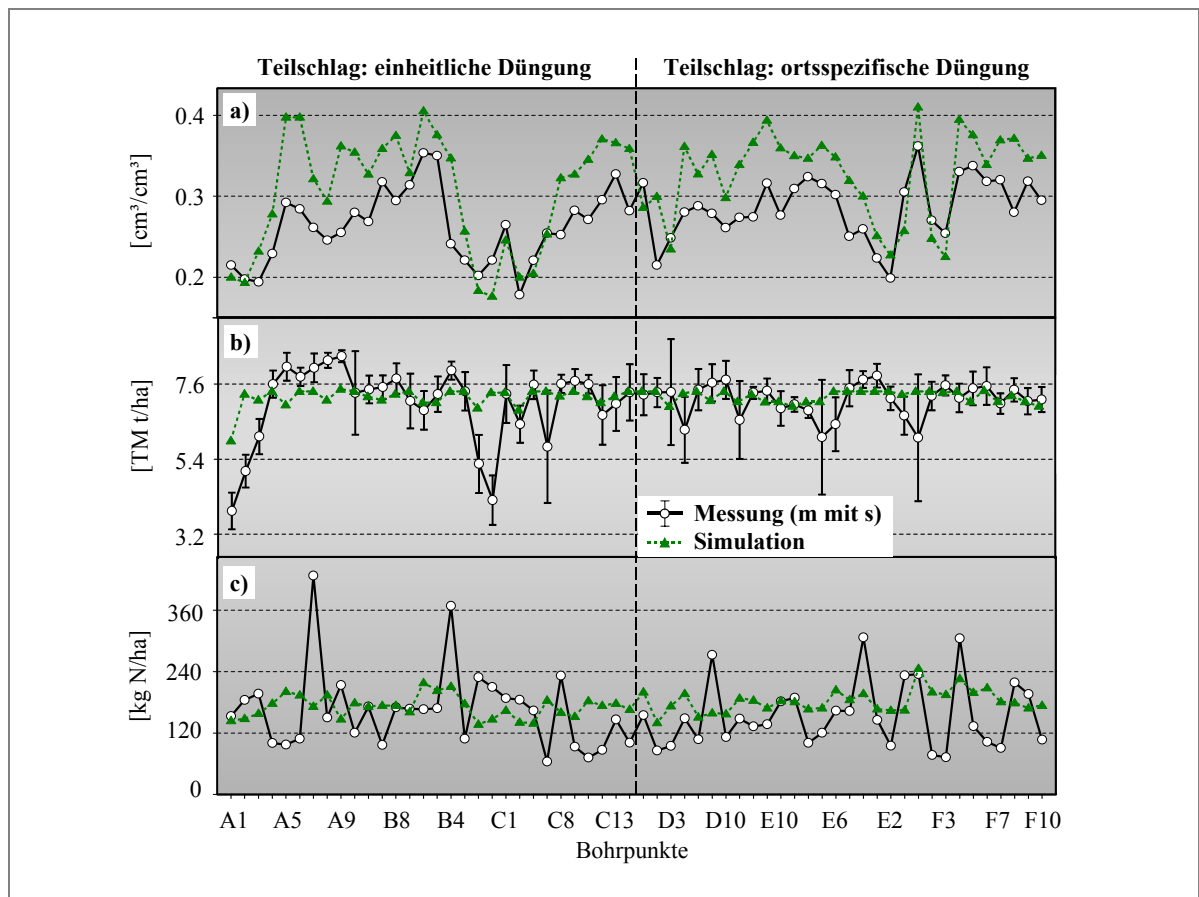
**Abb. 9.7:** Zonierung der Ertragskarten von 1999 bis 2001 für Schlag *Kamp-Ost*



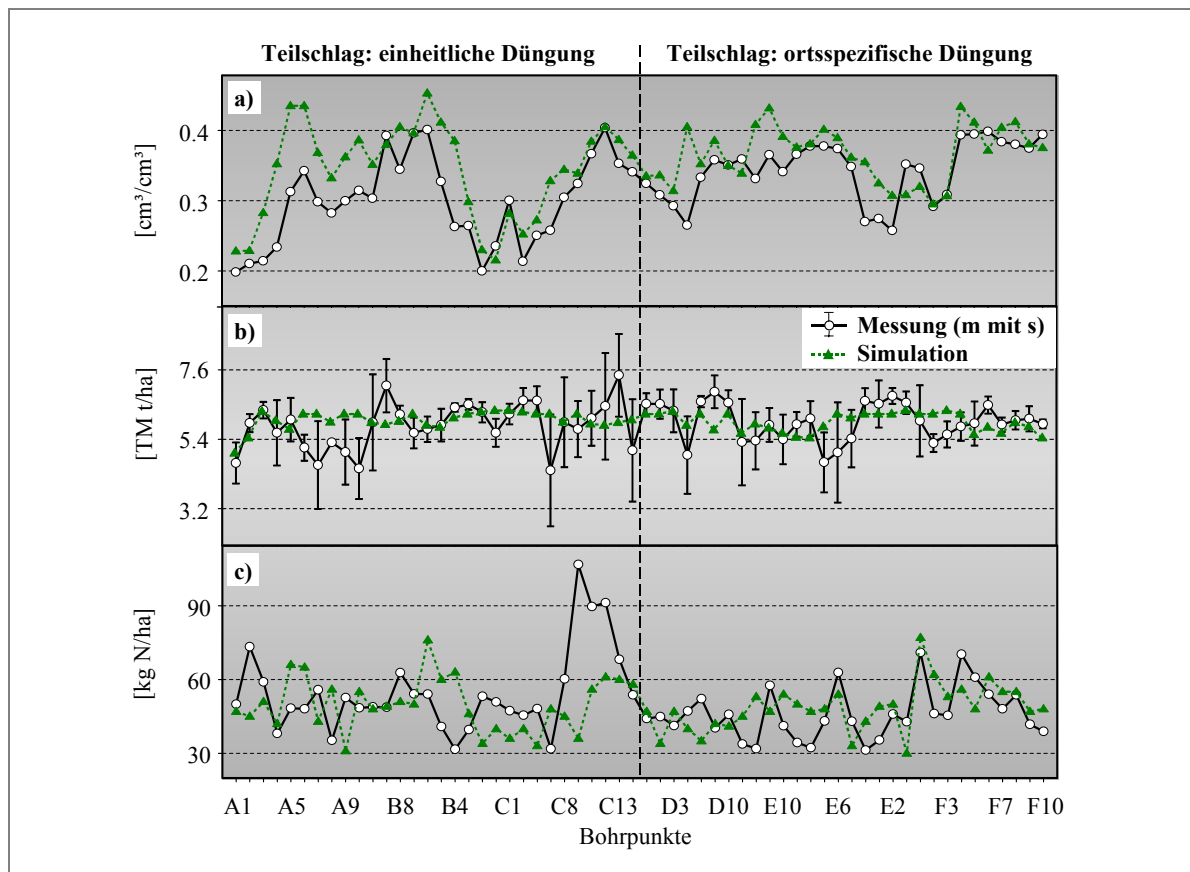
**Abb. 9.8:** Ertragsklassifizierung (basierend auf den Ertragszonen von 1999 bis 2001) für Schlag *Feldscheide-links* mit Klassengrenzen der Bodenart aus der Rasterkartierung



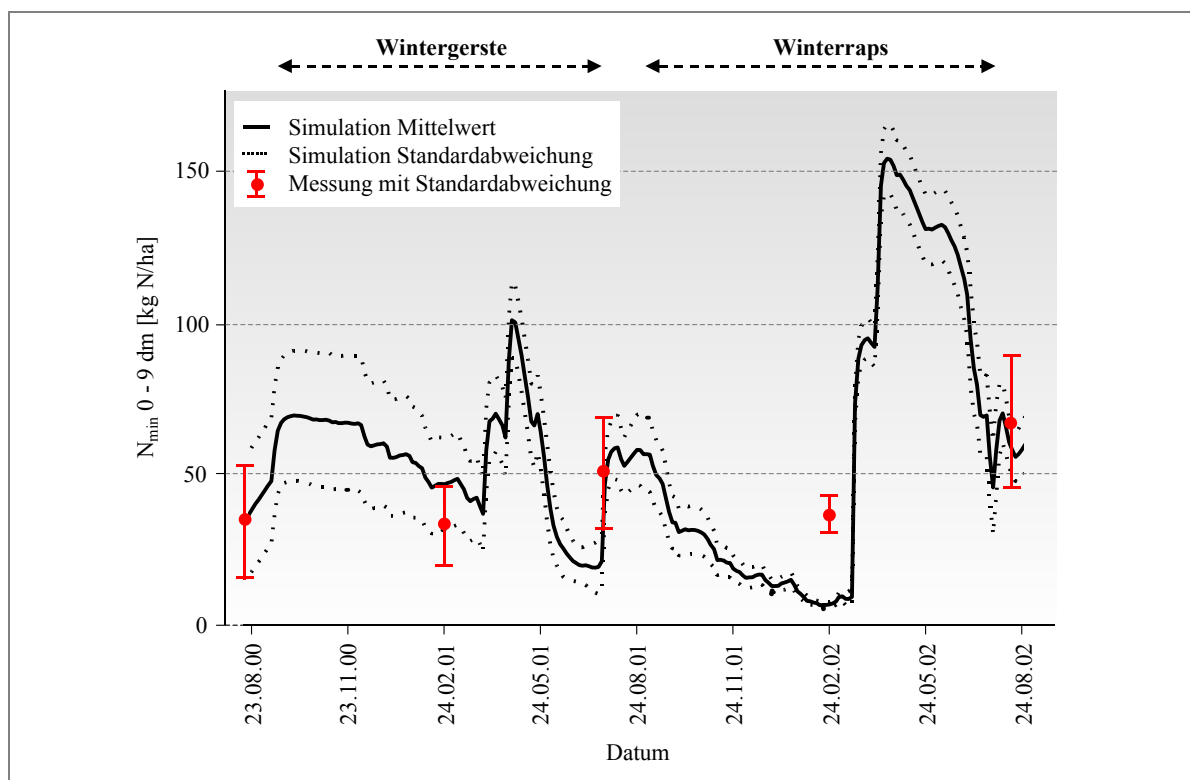
**Abb. 9.9:** Ertragsklassifizierung (basierend auf den Ertragszonen von 1999 bis 2001) für Schlag *Kamp-Ost* mit Klassengrenzen der Bodenart aus der Rasterkartierung



**Abb. 9.10:** Vergleich gemessener und simulierter Werte nach zweijähriger Simulation zu Winterweizen in 2001 auf Schlag *Autobahn*: a) beim Wassergehalt (0 - 9 dm), b) beim Kornertrag und c) beim  $N_{\min}$ -Gehalt (0 - 9 dm) nach der Ernte

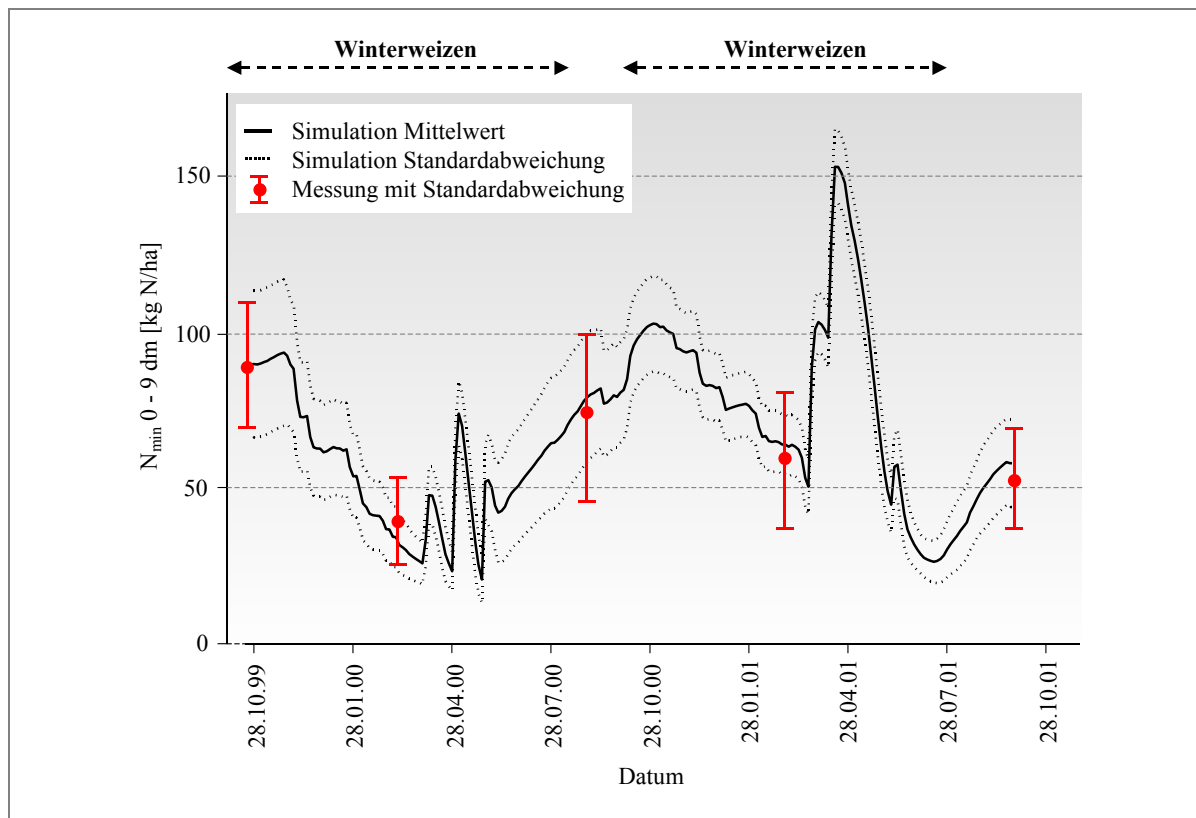


**Abb. 9.11:** Vergleich gemessener und simulierter Werte nach dreijähriger Simulation zu Winterweizen in 2002 auf Schlag *Autobahn*: a) beim Wassergehalt (0 – 9 dm), b) beim Kornertrag und c) beim  $N_{\min}$ -Gehalt (0 – 9 dm) nach der Ernte

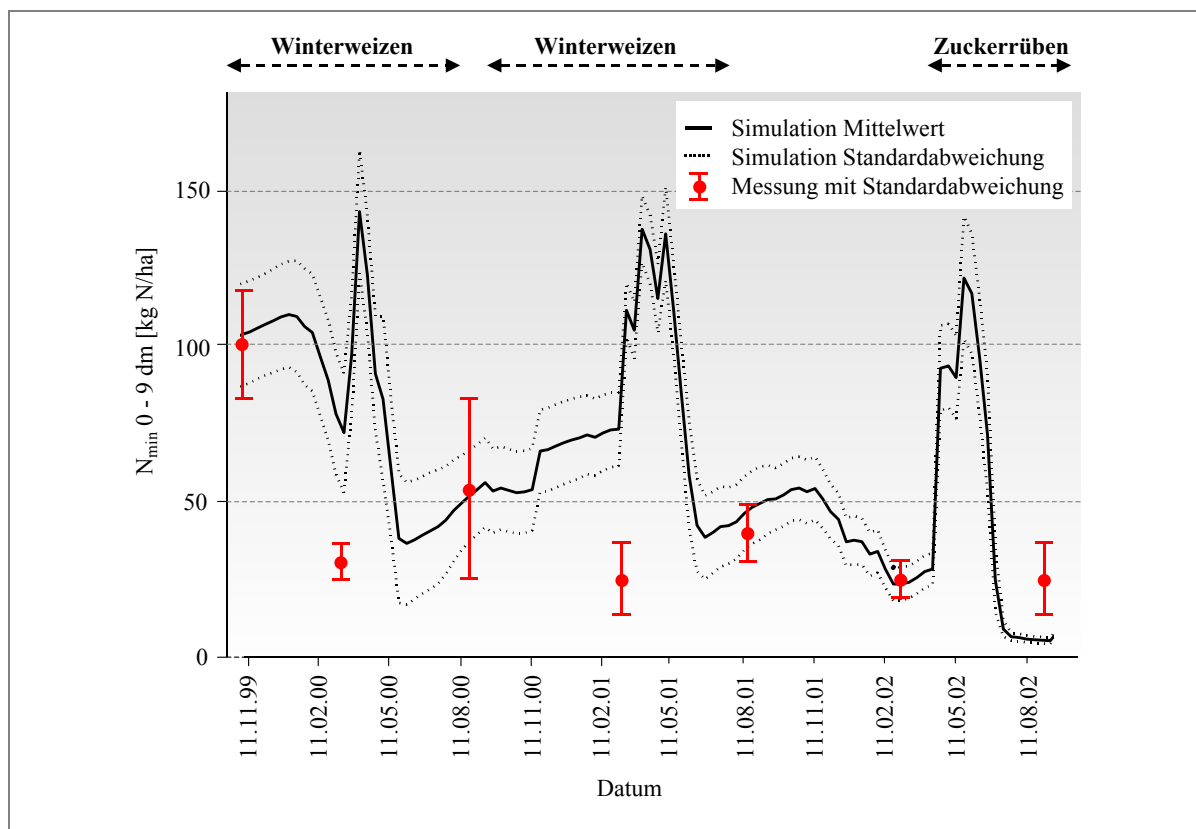


**Abb. 9.12:** Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 – 9 dm) des Schlags *Feldscheide-links* während des Untersuchungszeitraumes 2000 bis 2001 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 50)

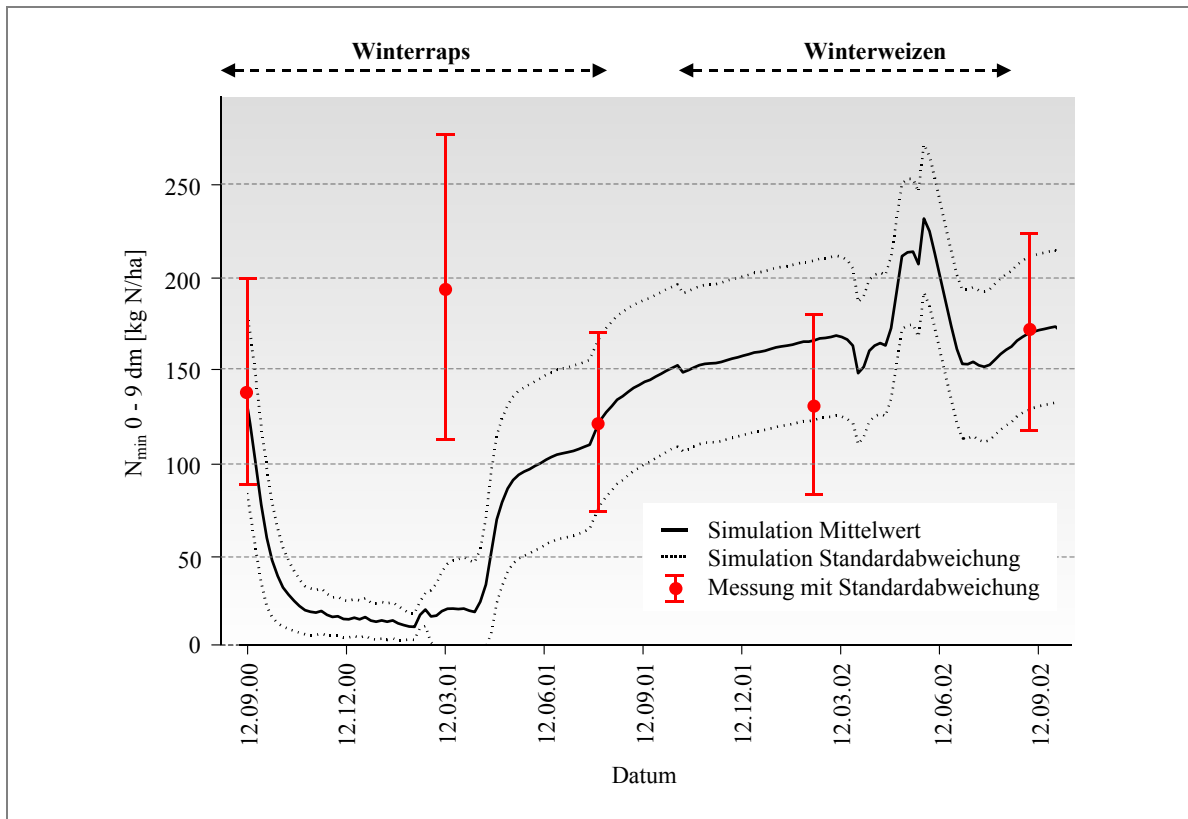




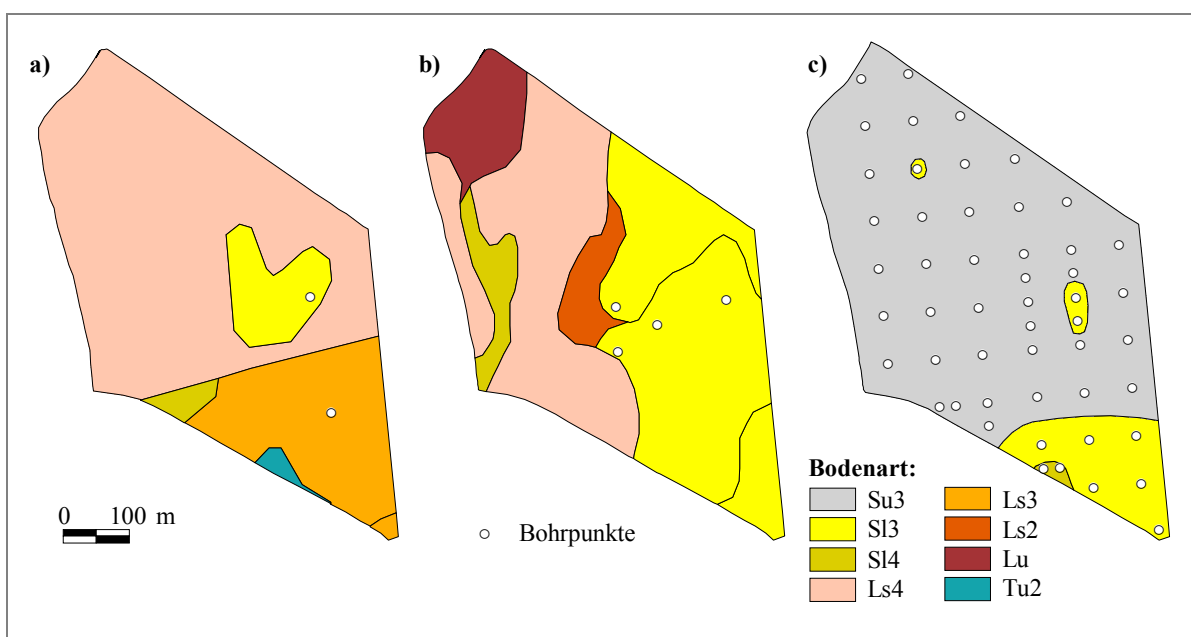
**Abb. 9.13:** Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) des Schlages *III-3* während des Untersuchungszeitraumes 1999 bis 2001 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 116)



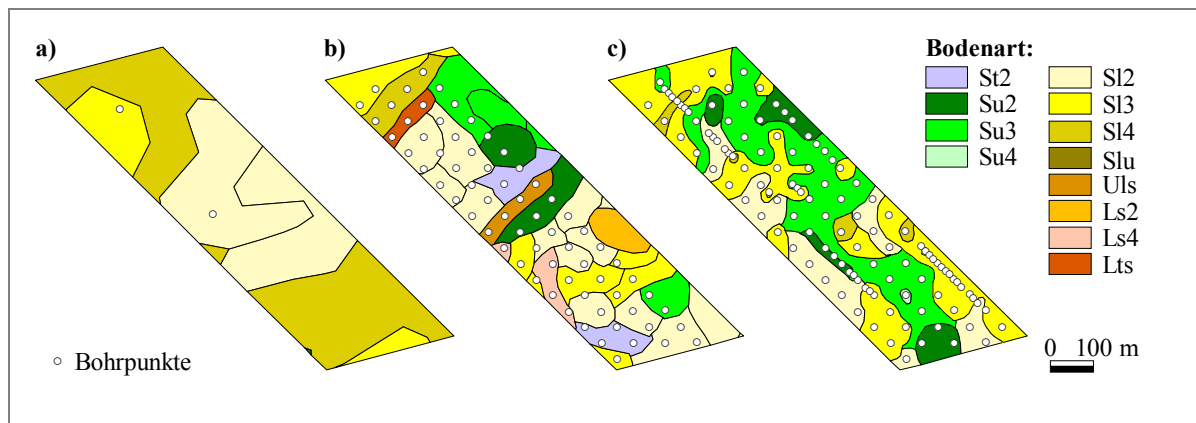
**Abb. 9.14:** Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) des Schlages *Kamp-Ost* während des Untersuchungszeitraumes 1999 bis 2002 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 59)



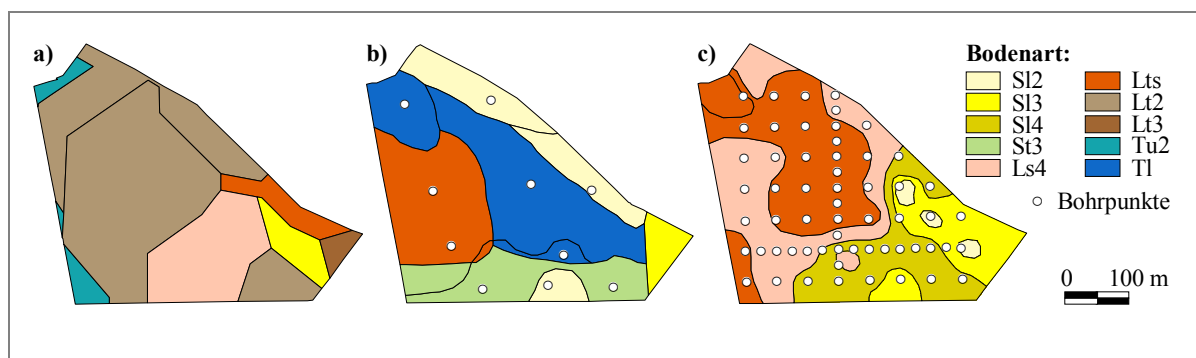
**Abb. 9.15:** Darstellung der simulierten und gemessenen mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte in der Wurzelzone (0 - 9 dm) des Schlags *Finkenherd* während des Untersuchungszeitraumes 2000 bis 2002 an den Bohrpunkten des Standardrasters (n = 51)



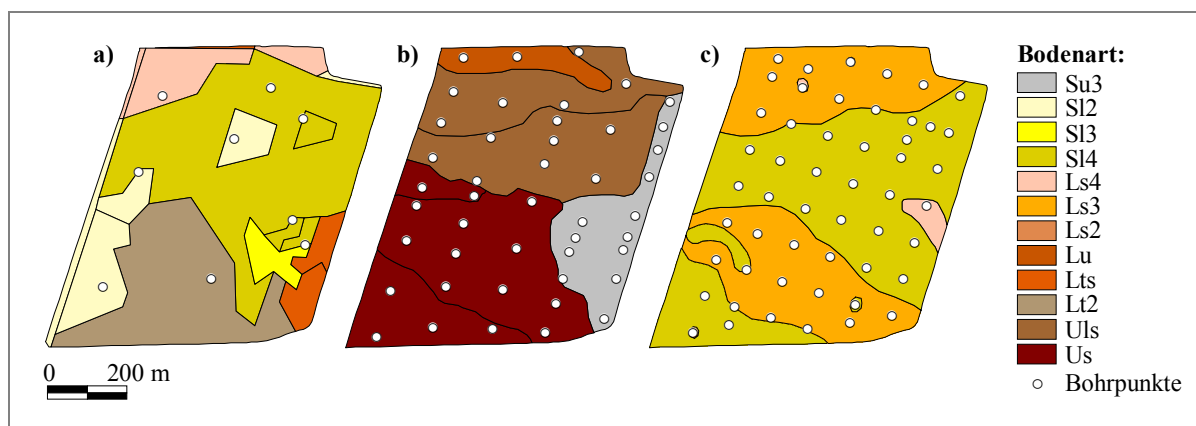
**Abb. 9.16:** Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag *Feldscheide-links*: a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung



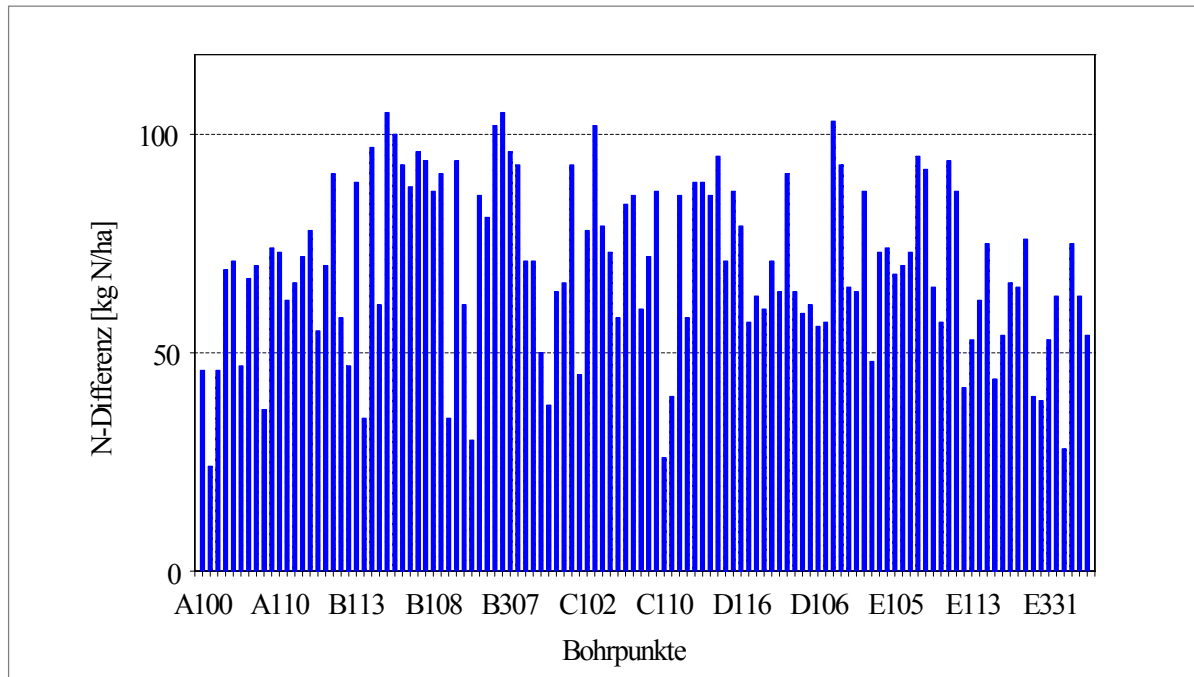
**Abb. 9.17:** Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag *III-3*: a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung



**Abb. 9.18:** Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag *Kamp-Ost*: a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung



**Abb. 9.19:** Karte der Bodenarten (0 - 9 dm) für Schlag *Finkenherd*: a) nach Reichsbodenschätzung, b) nach Hofbodenkarte und c) nach Rasterbeprobung



**Abb. 9.20:** N-Differenz an den Bohrpunkten (einheitliche betriebsüblicher Düngung minus Düngung nach Modellempfehlung) für Winterweizen in 2000 – Schlag 111 – 3

## Lebenslauf

Familienname:	Lorenz	
Vorname:	Karsten	
Geburtsdatum:	17.12.1967	
Geburtsort:	Beeskow	
Familienstand:	ledig	
Ausbildung/ Berufserfahrung:	1974 – 1984	zehnklassige allgemeinbildende Oberschule (POS) in Tauche
	1984 – 1986	Abitur an der erweiterten Oberschule (EOS) in Beeskow
	1986 – 1988	Grundwehrdienst
	1988 – 1993	Studium der Pflanzenproduktion an der Humboldt Universität zu Berlin
	1993 – 1997	Aufbaustudium zum Tropenwasserwirt an der FH NON in Suderburg
	1996	Auslandspraktikum an der Aleppo Universität
	1998 – 1999	GIS-Ausbildung in Dresden
	1999 – 2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZALF im BMBF Verbundprojekt <i>preagro</i> in Müncheberg

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, Karsten Lorenz, dass ich die hier vorliegende Dissertation zum Thema: "Nutzung der räumlichen Variabilität von ausgewählten Standorteigenschaften für die ortsspezifische N-Düngung – Messung und Simulation" Selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Alle hierzu benutzte Literatur wurde vollständig angegeben. Diese Dissertation lag bisher weder in Teilen noch als Ganzes einem Promotionsverfahren zugrunde.

Karsten Lorenz

Werder, den 01.10.2004